

Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências
Departamento de Engenharia Geográfica,
Geofísica e Energia



**Modelação, Simulação e Optimização
de um Sistema para Aproveitamento de
Energia dos Oceanos**

Ana Catarina de Oliveira Caldeira

VERSÃO PÚBLICA

DISSERTAÇÃO

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DA ENERGIA E DO AMBIENTE

2014

Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências
Departamento de Engenharia Geográfica,
Geofísica e Energia



**Modelação, Simulação e Optimização
de um Sistema para Aproveitamento de
Energia dos Oceanos**

Ana Catarina de Oliveira Caldeira

DISSERTAÇÃO

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DA ENERGIA E DO AMBIENTE

DISSERTAÇÃO ORIENTADA POR PROFESSOR DOUTOR PAULO JUSTINO

2014

Esta tese é dedicada aos meus avós, pais e irmão.

Resumo

Este trabalho insere-se no primeiro estudo de um novo sistema de aproveitamento de energia das ondas *offshore*. O dispositivo proposto é um corpo oscilante que apresenta como inovação a forma como é extraída a energia pelo dispositivo. Uma vez que, a extracção de energia é realizada através do deslocamento de uma massa deslizando interna.

O objectivo deste trabalho é desenvolver modelos matemáticos para simular numericamente o comportamento e otimizar a performance do dispositivo proposto.

Para tal, foi desenvolvido em *Matlab* um programa que simula o desempenho no domínio da frequência para ondas regulares e outro para ondas irregulares (modelo estocástico). O dispositivo apresenta algumas restrições, relativas ao equilíbrio do sistema, ao deslocamento da massa deslizando e ao centro de gravidade (CG) desta massa, necessárias impor ao algoritmo, sendo que o processo de optimização do comportamento do dispositivo ficou encarregue aos algoritmos genéticos. Foram considerados diferentes cenários para a massa da bóia e para o mecanismo de conversão de energia das ondas (PTO).

Da análise dos resultados obtidos, verificou-se que para o modelo da frequência a largura de captura do dispositivo apresenta dependência da massa da bóia e do cenário do PTO considerado.

Para ambos os modelos, conclui-se que a potência média extraída pelo dispositivo é bastante afectada pelo valor da massa deslizando, sendo que quando este aumenta a potência média extraída pelo dispositivo também aumenta.

Relativamente ao modelo estocástico, realizou-se um estudo do dispositivo com quilha, de modo a aumentar-se o valor da massa deslizando. Comparando os resultados, obteve-se melhores capturas de largura para o dispositivo com quilha.

Conclui-se com este trabalho que o novo conceito de corpo oscilante *offshore* proposto comportou-se eficientemente no domínio da frequência quer para ondas regulares quer para ondas irregulares, apresentando resultados bastantes positivos com um enorme potencial.

Palavras-chave: Energia das ondas; Corpo Oscilante; Modelação Numérica; Optimização; Algoritmos Genéticos.

Abstract

This work is part of the first study of a new wave energy device. The proposed device is an offshore oscillating body system that presents as innovation the energy extracted method based on internal sliding mass.

The overall aim of the work was the development of mathematical models to simulate the behavior and optimize the performance of the proposed device.

To this propose, frequency-domain models for regular waves and irregular waves (stochastic model) were developed using Matlab. The device presents several restrictions regarding to the balance of the system, the displacement of the slider mass and the center of gravity (CG) of this mass which needs to be restricted during the optimization process. Taken those into account, the performance of the device was optimized using genetic algorithms. Different scenarios were considered for the mass of the float and for the power take-off equipment.

The obtained results for frequency-domain in regular waves showed that the capture width is highly sensitive to the mass of the float and to the power take-off equipment scenario.

For booth models tested, it is possible to observe that the average power extracted by the device is influenced by the value of the sliding mass when this value increases the average power also increases.

Furthermore, for the stochastic model a study was carried out for the device with a keel, in order to increase the value of the sliding mass. Comparing the results, better capture widths were obtained for the device with a keel.

In conclusion, with this work the models and methods required to study the proposed device were established. Such models allow also to conclude that the proposed wave energy device achieves very good results and huge potential in frequency-domain for both regular and irregular waves.

Key words: Wave energy; Oscillating Body System; Numerical Modelling; Optimization; Genetic Algorithms.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço ao Professor Paulo Justino pela oportunidade que me deu em realizar este trabalho e pelo voto de confiança que depositou em mim, pelo qual dei o máximo possível de mim durante todo o meu trabalho. Agradeço a orientação ao longo de todo o trabalho, a forma acolhedora, compreensiva e cordial com que sempre me recebeu e me ajudou, e também a demonstração de preocupação e a forma atenciosa como sempre tratou e acompanhou as tarefas de desempenho. Agradeço também, a sua total disponibilidade durante todo o trabalho, pela paciência sem limites para esclarecer todas as dúvidas e pela aprendizagem que me possibilitou sobre os variados assuntos, quer relacionados ou não com o trabalho realizado. Agradeço pela capacidade de orientação forte e ao mesmo tempo descontraída e exigente, e a boa capacidade de ensinar que me proporcionou uma grande aprendizagem durante todo este processo.

Agradeço também aos meus amigos e colegas da FCUL todo o apoio, amizade, disponibilidade e aprendizagem que me proporcionaram durante os anos de curso. Pela companhia e por todos os momentos que passamos juntos durante o tempo que nos conhecemos.

Agradeço também aos meus amigos de infância, Joana Vista, Diogo Dias, Diogo Cascais e Ângelo, toda a amizade e apoio que me dão e sempre me deram.

A todos os funcionários do LNEG, do Laboratório de Energia (LEN) da Unidade de Análise Energética e Redes (UAER), em especial ao António Couto, ao Luís Rodrigues e à Raquel, agradeço pela simpatia, disponibilidade e encorajamento durante todo o trabalho.

Um sincero obrigado aos meus pais, irmão e avó, Luis Caldeira, Fernanda Caldeira, Diogo Caldeira e Joaquina Grilo, respectivamente, que me apoiaram sempre de forma incondicional e contribuíram para a minha construção como pessoa, o que se reflete em tudo o que faço, refletindo-se também neste trabalho.

Por fim, agradeço ao meu melhor amigo, Nuno André da Silva, pelo apoio incansável durante todo este tempo. Pela amizade, compreensão e disponibilidade que sempre demonstrou, é sem dúvida uma ajuda preciosa em todos os momentos da minha vida.

Conteúdo

RESUMO	i
ABSTRACT	iii
AGRADECIMENTOS	v
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento Geral e Motivação	1
1.2 Objectivo e Estrutura da Dissertação	6
2 CLASSIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DE SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS	7
2.1 Introdução	7
2.2 Coluna de Água Oscilante (CAO)	10
2.2.1 Estruturas Fixas	10
2.2.1.1 Central Piloto Europeia da Ilha do Pico	12
2.2.1.2 Central <i>LIMPET</i>	13
2.2.2 Flutuante	13
2.3 Corpos Oscilantes	15
2.3.1 Flutuantes	15
2.3.1.1 Translação	15
2.3.1.1.1 Sistema com um corpo oscilante	16
2.3.1.1.2 Sistema com dois corpos oscilantes	16
2.3.1.2 Rotação	18
2.3.2 Submersos	21
2.3.2.1 Translação	21
2.3.2.2 Rotação	22
2.4 Galgamento	23
2.4.1 Estrutura Fixa	24
2.4.2 Flutuante	24
2.5 <i>Power Take-Off</i> (PTO)	26
2.5.1 Turbinas	27
2.5.1.1 Turbinas a Ar	27
2.5.1.2 Turbinas Hidráulicas	27
2.5.2 Sistemas Hidráulicos	28

2.5.3	Geradores	29
3	MODELAÇÃO MATEMÁTICA	31
3.1	Introdução	31
3.2	Interacções Onda-Corpo	32
3.3	Equações do Movimento	34
3.4	Modelo no Domínio do Tempo	37
3.5	Modelo no Domínio da Frequência	39
3.6	Modelo Estocástico	41
3.7	Momentos de Inércia e Centro de Gravidade	45
3.8	WAMIT	49
4	OPTIMIZAÇÃO	55
4.1	Introdução	55
4.2	Algoritmos Genéticos (AGs)	57
4.2.1	Função Objectivo e Restrições	57
4.2.2	Operadores Genéticos	58
4.3	Procedimento de Optimização do Dispositivo	60
4.3.1	Restrições	62
4.3.1.1	Equilíbrio do Sistema	62
4.3.1.2	Deslocamento da Massa 1 e o seu Centro de Gravidade	65
4.3.1.3	Função a optimizar com restrições	67
4.3.2	Opções das Definições do AG	69
4.4	Fluxograma dos Modelos Matemáticos	73
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
5.1	Introdução	77
5.2	Modelo no Domínio da Frequência	78
5.2.1	Resultados	78
5.2.2	Discussão	87
5.3	Modelo Estocástico	88
5.3.1	Resultados	90
5.3.1.1	Resultados do Dispositivo com Quilha	98
5.3.2	Discussão	102
5.4	Conclusão	102
6	SUMÁRIO, DISCUSSÃO E TRABALHOS FUTUROS	105
6.1	Sumário	105
6.2	Discussão Geral e Trabalhos Futuros	106
6.3	Conclusão	109

A	As ONDAS	111
A.1	Características das Ondas	112
A.2	Distribuição Estatística	115
A.3	Representação Espectral das Ondas	116
B	OPÇÕES WAMIT	119
B.1	Ficheiros de Entrada	119
C	REGRA DO TRAPÉZIO	125
	REFERÊNCIAS	126

Lista de Figuras

1.1	Emissões mundiais de CO ₂ na queima de combustíveis fósseis de 1990-2040.	1
1.2	Consumo Mundial de energia de 1990-2040.	2
1.3	Distribuição do potencial mundial das ondas em kW/m.	4
1.4	Recurso das Ondas em Portugal.	5
2.1	Classificação de dispositivos quanto à distância à linha de costa.	8
2.2	Esquema com a dimensão e/ou orientação dos dispositivos.	9
2.3	Classificação de Dispositivos de Conversão de Energia das Ondas.	9
2.4	Esquema representativo de um dispositivo de CAO.	10
2.5	Exemplos de dispositivos de Coluna de Água Oscilante <i>nearshore</i> fixos em estruturas.	11
2.6	Central Piloto Europeia da Ilha do Pico.	12
2.7	Central <i>LIMPET</i>	13
2.8	CAO flutuante <i>Mighty Whale</i>	14
2.9	CAO flutuante da <i>Oceanlinx</i>	15
2.10	Corpo oscilante <i>Norwegian buoy</i> em 1983.	16
2.11	Corpo oscilante <i>IPS</i>	17
2.12	Corpo oscilante <i>AquaBuOY</i>	18
2.13	Corpo oscilante <i>Wavebob</i>	18
2.14	Corpo oscilante <i>Powerbuoy</i>	18
2.15	Esquema do corpo oscilante <i>The Duck</i>	19
2.16	Corpo oscilante <i>Pelamis</i>	20
2.17	Esquema do corpo oscilante <i>McCabe Wave Pump</i>	20
2.18	Corpo oscilante <i>PS Frog Mk 5</i>	21
2.19	Esquema do corpo oscilante <i>Searev</i>	21
2.20	Corpo oscilante submerso <i>Archimedes Wave Swing (AWS)</i>	22
2.21	Corpo oscilante submerso <i>WaveRoller</i>	23
2.22	Fotografia do <i>Oyster</i>	23
2.23	Dispositivo de galgamento <i>Tapchan</i>	24
2.24	Dispositivo de galgamento <i>SSG</i>	25
2.25	Dispositivo de galgamento flutuante <i>Wave Dragon</i>	25
2.26	Princípio de funcionamento e esquema do dispositivo de galgamento flutuante <i>Wave Dragon</i>	26
2.27	Esquema com os diferentes PTO.	26
2.28	Esquema do PTO - Sistema Hidráulico.	28

3.1	Desenvolvimento da modelação em diferentes fases do dispositivo.	31
3.2	Nomenclatura utilizada para definir os graus de liberdade.	33
3.3	Nomenclatura utilizada para definir os graus de liberdade do dispositivo em estudo.	34
3.4	Esquema do sistema mola-amortecedor-massa.	36
3.5	Etapas do trabalho de modelar e otimizar um conversor de energia das ondas.	53
4.1	O mínimo de $f(x)$ é o mesmo que o máximo de $-f(x)$	55
4.2	Fluxograma que descreve a função do algoritmo genético.	60
4.3	Estudo do equilíbrio do sistema para cada massa da bóia e da massa 1. . .	64
4.4	Dimensões obtidas para a massa 1 para os dois tipos de material: chumbo e aço.	66
4.5	Fluxograma com o processo de optimização que ocorre no modelo no domínio da frequência.	71
4.6	Fluxograma com o processo de optimização que ocorre no modelo estocástico.	72
4.7	Exemplo da interpolação para o Espectro de Pierson-Moskowitz com $H_s = 1\text{m}$ e $T_e = 5\text{s}$: a verde são os dados originais e a preto os interpolados.	73
4.8	Fluxograma com o modelo no domínio da frequência.	74
4.9	Fluxograma com o modelo estocástico.	75
5.1	Largura de captura com frequência de ressonância, em metros, para os vários cenários da massa da bóia, M_b , assumindo que o PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L ($K_L = 0$), para ondas regulares.	78
5.2	Largura de captura e potência média extraída pelo sistema PTO para os vários cenários da massa da bóia, M_b , assumindo que o PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L ($K_L = 0$), para ondas regulares.	79
5.3	Coeficiente de amortecimento D_L para os vários cenários da massa da bóia, M_b , assumindo que o PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L ($K_L = 0$), para ondas regulares.	80
5.4	Resultados da restrição do equilíbrio do dispositivo para os vários cenários da massa da bóia, M_b , assumindo que o PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L ($K_L = 0$), para ondas regulares.	81
5.5	Resultados da restrição da coordenada x da massa 1 para os vários cenários da massa da bóia, M_b , assumindo que o PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L ($K_L = 0$), para ondas regulares.	82

5.6	Amplitude do deslocamento da massa 1 para os vários cenários da massa da bóia, M_b , assumindo que o PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L ($K_L = 0$), para ondas regulares.	83
5.7	Largura de captura, em metros, e potência média extraída pelo sistema, em MW, para os vários cenários da massa da bóia, M_b , assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas regulares.	84
5.8	Coeficiente de amortecimento D_L para os vários cenários da massa da bóia, M_b , assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas regulares.	84
5.9	Coeficiente de mola K_L , para os vários cenários da massa da bóia, M_b , assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas regulares.	85
5.10	Resultados da restrição de equilíbrio do dispositivo, para os vários cenários da massa da bóia, M_b , assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas regulares.	85
5.11	Resultados da restrição da coordenada x da massa 1, para os vários cenários da massa da bóia, M_b , assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas regulares.	86
5.12	Amplitude do deslocamento da massa 1 para os vários cenários da massa da bóia, M_b , assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas regulares.	86
5.13	Espectro de Pierson-Moskowitz para $H_s = 1\text{m}$ e $T_e = 5\text{s}$, $T_e = 8\text{s}$, $T_e = 11\text{s}$, $T_e = 14\text{s}$ e $T_e = 17\text{s}$	89
5.14	Largura de captura e potência média extraída pelo dispositivo para períodos de energia de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s e H_s igual a 1 m, assumindo o cenário a) para o sistema PTO, para ondas irregulares.	90
5.15	Coeficiente de amortecimento mecânico D_L para H_s igual a 1 m e T_e de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s, assumindo o cenário a) para o sistema PTO, para ondas irregulares.	91
5.16	Resultados da restrição de equilíbrio do dispositivo para H_s igual a 1 m e T_e de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s, assumindo o cenário a) para o sistema PTO, para ondas irregulares.	92
5.17	Coordenada x do centro de gravidade da massa 1 para H_s igual a 1 m e T_e de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s, assumindo o cenário a) para o sistema PTO, para ondas irregulares.	92

5.18	Variância do deslocamento da massa 1 para H_s igual a 1 m e T_e de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s, assumindo o cenário <i>a</i>) para o sistema PTO, para ondas irregulares.	93
5.19	<i>Load Force</i> para H_s igual a 1 m e T_e de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s, assumindo o cenário <i>a</i>) para o sistema PTO, para ondas irregulares.	94
5.20	Largura de captura e potência média extraída pelo dispositivo para o cenário da massa da bóia: $M_b = 10\%M_T$, assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas irregulares.	95
5.21	Coeficiente de amortecimento e coeficiente de mola para o cenário da massa da bóia: $M_b = 10\%M_T$, assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas irregulares.	96
5.22	Resultados da restrição de equilíbrio do dispositivo para o cenário da massa da bóia: $M_b = 10\%M_T$, assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas irregulares.	96
5.23	Coordenada x do centro de gravidade da massa 1 para o cenário da massa da bóia: $M_b = 10\%M_T$, assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas irregulares.	97
5.24	Variância do deslocamento da massa 1 para o cenário da massa da bóia: $M_b = 10\%M_T$, assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas irregulares.	97
5.25	Comparação dos resultados da largura de captura do dispositivo com e sem quilha para períodos de energia de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s e H_s igual a 1 m, assumindo o cenário <i>a</i>) para o sistema PTO, para ondas irregulares.	99
5.26	Resultados da restrição de equilíbrio do dispositivo com quilha para períodos de energia de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s e H_s igual a 1 m, assumindo o cenário <i>a</i>) para o sistema PTO, para ondas irregulares.	100
5.27	Coordenada x do centro de gravidade da massa 1 do dispositivo com quilha para períodos de energia de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s e H_s igual a 1 m, assumindo o cenário <i>a</i>) para o sistema PTO, para ondas irregulares.	100
5.28	Coordenada x do centro de gravidade da massa 1 do dispositivo com quilha para períodos de energia de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s e H_s igual a 1 m, assumindo o cenário <i>a</i>) para o sistema PTO, para ondas irregulares.	101
A.1	Desenvolvimento das ondas de superfície por acção do vento na superfície do oceano.	111

A.2	Característica de uma onda	112
A.3	Trajectória das partículas de fluído em diferentes profundidades.	114
A.4	Registo de uma bóia oceanográfica ao largo do Atlântico Norte.	115
A.5	Esquema de transformação de uma série temporal para o domínio das frequências através da transformada de Fourier.	116
A.6	Resultado da soma de ondas com diferentes amplitudes, comprimentos e direcções.	117
A.7	Espectro de energia das ondas, que mostra a distribuição de energia para cada frequência.	117
B.1	Esquema dos ficheiros de entrada no WAMIT.	119

Lista de Tabelas

1.1	Resultados teóricos anuais do recurso por cada tipo de energia dos oceanos.	3
4.1	Resultados do estudo do equilíbrio do sistema: intervalos da massa 1. . .	63
A.1	Classificação de profundidade.	113
B.1	Opções do ficheiro de entrada “.pot”.	120
B.2	Opções do ficheiro de entrada “.frc”.	121
B.3	Opções do ficheiro de entrada “.wam”.	123
B.4	Opções do ficheiro de entrada “.wam”.	124

1

Introdução

1.1 Enquadramento Geral e Motivação

A dependência mundial dos combustíveis fósseis, a respectiva política económica e a crescente consciencialização sobre os problemas ambientais, têm tido um efeito crucial no desenvolvimento das energias renováveis.

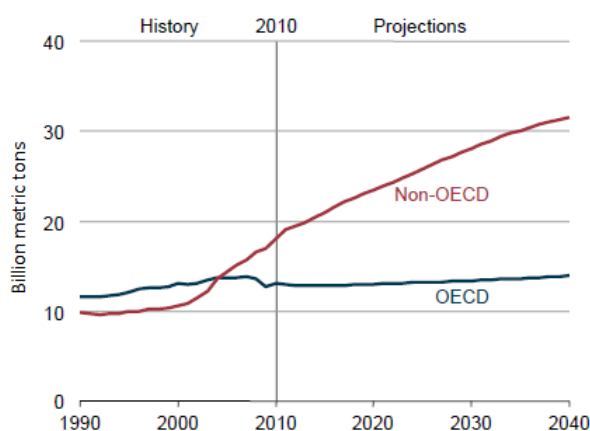


Figura 1.1: Emissões mundiais de CO₂ na queima de combustíveis fósseis de 1990-2040. Adaptado de [EIA, 2013].

A necessidade de promover políticas energéticas que assegurem um desenvolvimento sustentável é essencial no domínio da energia. Cada vez mais somos confrontados com a exigência de encontrar nas energias renováveis uma alternativa real e fiável às formas convencionais de produção de energia elétrica, responsáveis por sérias ameaças ao meio ambiente. A maioria das emissões de dióxido de carbono provêm da queima de combustíveis fósseis, que segundo as previsões da *Energy Information Administration* (EIA), no relatório *International Energy Outlook 2013* [EIA, 2013], vão au-

mentar até 2040, figura 1.1. Este aumento deve-se em grande parte ao desenvolvimento de países que não fazem parte da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), como a China, Índia, Brasil e África do Sul, que continuam a depender fortemente de combustíveis fósseis para atender ao acelerado crescimento da procura de energia [EIA, 2013].

A única razão pela qual continuamos a queimar combustíveis fósseis reside na necessidade de produção de energia. A EIA estima que o consumo global de energia deverá crescer 56% até 2040 [EIA, 2013], figura 1.2. Assim a produção de energia eléctrica através de energias renováveis apresenta-se como uma alternativa viável à crescente procura de energia e à necessidade de redução de emissões globais de CO_2 .

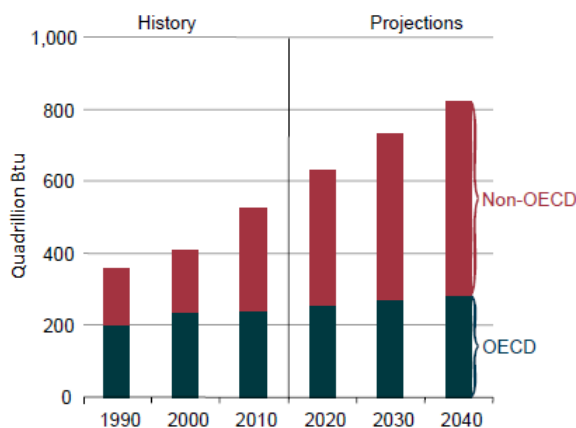


Figura 1.2: Consumo Mundial de energia de 1990-2040. Adaptado de [EIA, 2013].

Deste modo, é importante que se desenvolvam novas formas de produção de energia que sejam sustentáveis e que não prejudiquem, de forma drástica, o meio ambiente. As alternativas às formas convencionais de produção de energia eléctrica mais comuns são a energia hídrica, a energia eólica e a energia solar. Contudo, existe ainda uma fonte de energia renovável que está longe de se encontrar verdadeiramente explorada e que têm bastante potencial, a energia dos oceanos.

A percentagem de ocupação dos oceanos na superfície do planeta Terra é de 96.5% da água que compõem a superfície do planeta Terra. Nos oceanos manifestam-se diferentes formas de fluxos energéticos que levaram ao desenvolvimento de diferentes conceitos de como aproveitar a sua energia, das quais se destacam algumas:

- Energia do Gradiente Térmico: esta forma de energia é obtida da diferença de temperatura entre a água na superfície e as profundezas do oceano, por efeito da incidência da radiação solar;
- Energia do Gradiente de Salinidade: obtida da diferença de concentração de

salinidade entre o encontro da água dos oceanos e os rios, em locais como a foz dos rios, obtêm-se uma energia potencial criada pela diferença de pressão com base no fenómeno natural de osmose¹;

- Energia das Correntes da Maré: corrente da maré é o movimento horizontal (fluxo) alternado que a água transcreve periodicamente consoante a subida e descida da maré. A energia cinética presente nas correntes da maré pode ser transformada em energia eléctrica por conceitos semelhantes aos utilizados na energia eólica recorrendo ao uso de turbinas;
- Energia das Marés: energia resultante da rotação da Terra no seio dos campos gravitacionais da Lua e do Sol. A energia potencial obtida pela diferença de altura da maré, permite a construção de barragens fixas ou flutuantes em estuários ou oceanos a vários quilómetros da costa constituídas por comportas e grupos de turbina e gerador eléctrico;
- Energia das Ondas: a origem desta forma de energia, criada pela acção do vento na superfície do oceano é o resultado da redistribuição da radiação solar na atmosfera. A energia cinética criada pelo movimento das partículas de água e, energia potencial criada pela massa de água que se encontra afastada do seu nível de repouso pode ser transformada em energia eléctrica de diversos métodos.

O Oceano apresenta-se assim como um dos maiores fornecedores de energia renovável. Das diferentes formas de energia dos oceanos mencionadas anteriormente e segundo a tabela 1.1 [da Rocha et al., 2011], a energia das ondas apresenta-se como a maior das fontes de energia dos oceanos por explorar.

Tabela 1.1: Resultados teóricos anuais do recurso por cada tipo de energia dos oceanos. Adaptado de [da Rocha et al., 2011].

Tipo de Energia	Energia teórica anual [TWh/ano]
Gradiente de Temperatura	10000
Gradiente de Salinidade	2000
Correntes Marítimas	+800
Marés	+300
Ondas	8000 a 80000

A potência global do recurso disponível nas ondas para profundidades iguais ou superiores a 100 metros é estimado em cerca de 1 a 10 TW [Panicker, 1976]. Em 2001 o *World Energy Council* publicava no seu relatório anual [Council, 2001] que a capacidade de fornecimento de energia eléctrica a partir deste recurso é tal que, se aproveitados

¹Movimento da água entre meios com concentrações diferentes de solutos separados por uma membrana semipermeável.

de forma adequada, 10% do nível de consumo de electricidade mundial poderia ser fornecido por este recurso. Embora o aproveitamento de toda a energia disponível nos oceanos na forma de ondas seja impossível, a conversão em eletricidade de uma pequena fração deste enorme potencial energético pode ter grande significado para os países que dominarem esta tecnologia.

A figura 1.3 apresenta o recurso energético das ondas no mundo, o potencial em cada zona é representado em kW por metro de frente de onda. O recurso energético das ondas na Europa representa cerca de 16% do mundial, contabilizando assim 320 GW [Cruz and Sarmento, 2004]. Para a exploração da energia das ondas ser economicamente viável os níveis de energia devem ser superiores a 15-20 kW/m [Cruz and Sarmento, 2004], como acontece em Portugal.

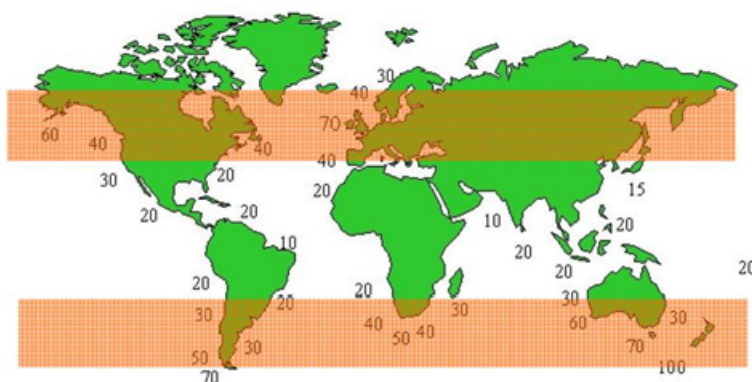
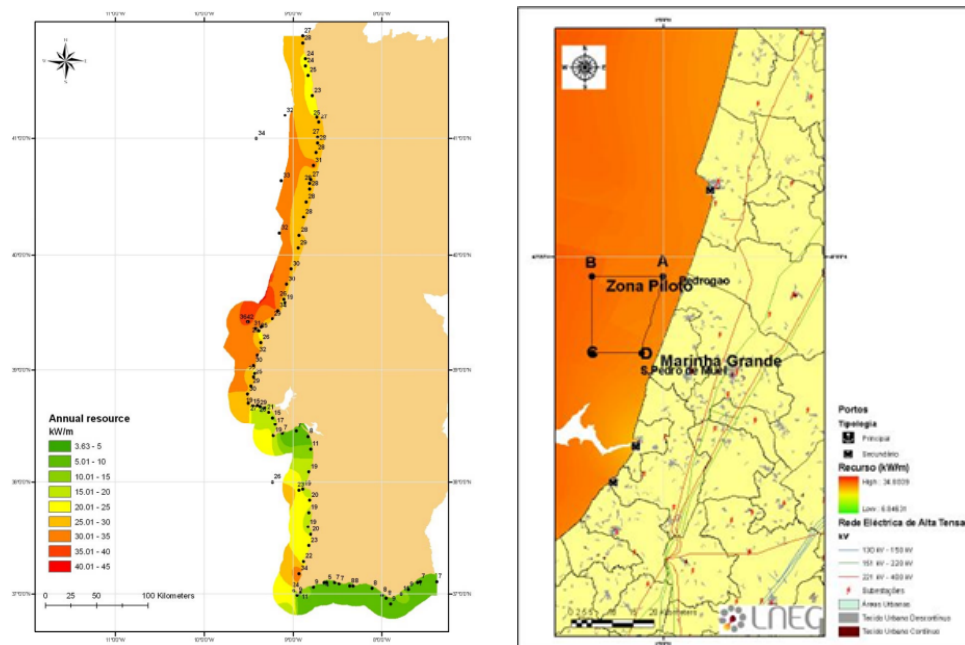


Figura 1.3: Distribuição do potencial mundial das ondas em kW/m de frente de onda. Adaptado de [Pontes, 2012].

No caso de Portugal, estes valores rondam os 21 GW, disponibilizando-se 16 GW no continente, figura 1.4a, e 6 GW para as Regiões Autónomas [Cruz and Sarmento, 2004]. Portugal apresenta uma extensa linha de costa, e o consumo nesta zona é superior ao resto do país. Assim, se Portugal dominar a tecnologia inerente ao mar, tendo em conta o recurso disponibilizado pelas ondas do mar, pode tornar-se fundamental para o fornecimento energético do país, o que seria fundamental para a independência energética do exterior.

Portugal têm-se tornado num dos líderes no desenvolvimento de tecnologias para aproveitamento de energia das ondas. Existem diversos conversores de energia das ondas (CEOs) (em notação inglesa: *Wave Energy Converts* - WEC) em desenvolvimento e em operação na costa do país. Este interesse e crescimento no desenvolvimento de CEOs veio acompanhado de uma legislação dedicada ao assunto, como é o caso da zona piloto portuguesa, que se revelou uma excelente forma de apoiar tecnologias em fase de desenvolvimento, que ainda apresentam um custo elevado. A zona piloto por-

tuguesa, figura 1.4b, foi regulamentada em 2008 para instalação de sistema de energia das ondas, ao largo de São Pedro de Moel, com uma área de 320 km², entre as profundidades de 30 e 90 m (em área *off-shore*, entre 5 e 8 km da costa). Com uma capacidade máxima instalada até 250 MW, para instalação de protótipos, conversores em escala pré-comercial e em escala comercial estimulando o desenvolvimento tecnológico [Clément et al., 2002]. O espaço é cedido em regime de concessão e um dos objetivos é atrair para o país empresas promotoras e produtoras de tecnologias de geração de energia a partir das ondas. É garantido um espaço para a interligação da zona piloto por cabos submarinos a uma subestação em terra. A zona piloto portuguesa representa o primeiro esboço de demarcação de zonas restritas e possíveis para concessão de parques de energia das ondas no país.



(a) Atlas do Recurso na Zona Costeira de Portugal em kW/m.

(b) Recurso das ondas na Zona Piloto.

Figura 1.4: Recurso das Ondas em Portugal. Adaptado de [Pontes, 2012].

A localização geográfica de Portugal coloca o país numa zona privilegiada para a exploração de energias renováveis, em particular da energia das ondas. As vantagens do território português resultam da existência de [Beirão, 2010]:

- uma vasta costa com uma potência de onda por unidade de comprimento média-alta;
- infra-estruturas ao longo da costa (como portos, estaleiros e rede eléctrica);

- políticas governamentais que estabelecem o recurso das ondas como energia renovável, sendo a compra de energia obrigatória e com tarifa aplicada sob regime bonificado;
- conhecimentos técnico-científicos nesta área, nomeadamente com o contributo do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) e o Instituto Superior Técnico (IST).

A implementação da tecnologia para aproveitamento de energia das ondas depara-se ainda com vários entraves, entre eles barreiras tecnológicas devido à irregularidade do recurso e aos esforços estruturais a que os dispositivos estão sujeitos, bem como barreiras económicas, resultantes dos elevados custos associados, nomeadamente, na passagem da fase de ensaios em modelo reduzido em laboratório para a demonstração com protótipo em mar real. Contudo, o crescente interesse nas energias renováveis, quer a nível nacional quer internacional, e o grande potencial que as ondas apresentam, deixa prever um aumento de investimentos nesta área e consequentemente o seu desenvolvimento e implementação.

1.2 Objectivo e Estrutura da Dissertação

O presente trabalho baseia-se no primeiro estudo realizado a um novo conceito de corpo oscilante para aproveitamento de energia das ondas *offshore* proposto neste trabalho. E tem como objectivo desenvolver modelos matemáticos para simular numericamente o comportamento e otimizar a performance do dispositivo proposto. O trabalho foi desenvolvido no Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG).

A dissertação está organizada em 7 capítulos, descritos abaixo.

O presente capítulo 1 apresenta o contexto, a motivação e a organização geral do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma pequena descrição de alguns exemplos de conversores de energia das ondas (CEOs).

O capítulo 3 introduz toda a formulação matemática necessária para criar os modelos para simular o comportamento do dispositivo.

No capítulo 4 é descrito a formulação e o procedimento de optimização do dispositivo em estudo.

O capítulo 5 apresenta a análise e discussão realizada aos resultados obtidos da simulação e optimização numérica do dispositivo.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta uma discussão detalhada da dissertação, bem como a conclusão e trabalhos futuros deste trabalho.

2

Classificação e Descrição de Sistemas de Conversão de Energia das Ondas

2.1 Introdução

As ondas quando formadas em alto mar, podem viajar milhares de quilómetros quase sem perdas de energia, começando a perder energia quando se aproximam da costa devido aos efeitos de atrito no fundo do mar. Contudo, o recurso energético das ondas apresenta uma grande variabilidade. Características como a irregularidade da amplitude, de fase e direcção, associada a condições extremas de operação torna difícil explorar a energia das ondas para a produção de electricidade. Tal tem criado grandes desafios aos investigadores e engenheiros na procura de soluções que permitam que as estruturas a serem utilizadas para aproveitamento de energia das ondas, suportem os esforços solicitados e ao mesmo tempo tenham capacidade de fornecer energia à rede eléctrica de forma ininterrupta.

Uma dificuldade adicional está relacionada com a concepção do mecanismo de conversão de energia das ondas (em notação inglesa: *Power Take-Off* (PTO)) (como a turbina de ar, os sistemas hidráulicos, os geradores ou outros), que deve ter a capacidade de converter as oscilações provocadas pelas ondas num fluxo de energia constante. O problema aqui está na adaptação há variabilidade do fluxo de energia absorvida a partir das ondas que pode variar em diferentes escalas de tempo: onda a onda (segundos), estado do mar (horas ou dias) e variações sazonais [Falcão, 2009]. Naturalmente, a capacidade de sobrevivência do PTO em condições extremas é outro problema importante.

Comparada com outras tecnologias de conversão de fontes de energia renovável, a tecnologia de conversão da energia das ondas encontra-se nos primeiros estágios de desenvolvimento.

As primeiras grandes tentativas de construir um dispositivo para conversão de energia das ondas (CEOs) tiveram lugar nos anos 70, quando se instalou a crise do petróleo que fomentou um súbito interesse em formas complementares de produção de energia. Contudo, passaram vários anos até se ganhar experiência para construir uma base de conhecimentos, uma vez que factores como a resistência dos materiais utilizados nos conversores de energia das ondas tornavam o investimento pouco apetecível do ponto de vista financeiro. No final da década de 90 o interesse renasceu levando à criação de vários projectos-piloto com o apoio da União Europeia.

Ao longo das últimas décadas, têm sido desenvolvidos diversos dispositivos de aproveitamento da energia das ondas [Falcão, 2009]. Existem actualmente diferentes soluções que respondem ao desafio tecnológico apresentado na extracção de energia das ondas. Estas tecnologias encontram-se em estágios diferentes de desenvolvimento e apresentam muitas vezes, concepções e princípios diferentes. Este estado de desenvolvimento dificulta o estabelecimento de uma classificação coerente que agrupe todos os sistemas desenvolvidos até hoje. Vários critérios têm sido propostos para classificar os sistemas de conversão da energia das ondas, na literatura [Falcão, 2009] encontram-se os seguintes critérios de classificação:

- Localização (ver figura 2.1):
 - Dispositivos costeiros (em notação inglesa: *onshore* ou *shoreline*);
 - Dispositivos próximos da costa (*near-shore*);
 - Dispositivos afastados da costa (*offshore*).

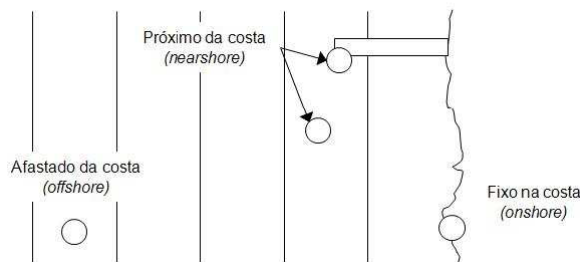


Figura 2.1: Classificação de dispositivos quanto à distância à linha de costa. Adaptado de [André, 2010].

- Princípio de funcionamento (ver figura 2.3);
- Dimensão e/ou orientação do dispositivo (ver figura 2.2):
 - Absorvedores pontuais (em notação inglesa: *Point absorbers*);
 - Atenuadores (*Attenuators*);
 - Terminadores (*Terminators*).

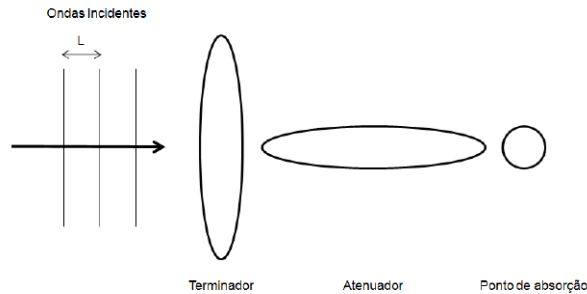


Figura 2.2: Esquema com a dimensão e/ou orientação dos dispositivos. Adaptado de [André, 2010].

Neste trabalho a classificação dos principais dispositivos vai ser baseada no princípio de funcionamento destes, abordagem utilizada por [Falcão, 2009] e que está esquematizada na figura 2.3. Esta classificação permite uma organização mais simples dos equipamentos e assenta essencialmente no modo físico como estes funcionam.

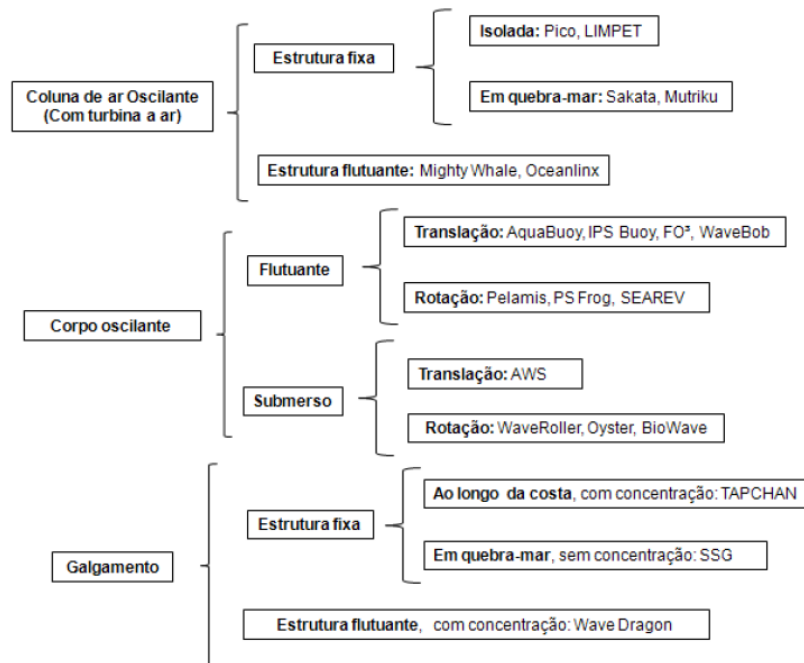


Figura 2.3: Classificação de dispositivos de conversão de energia das ondas (CEOs). Adaptado de [André, 2010, Falcão, 2009].

2.2 Coluna de Água Oscilante (CAO)

Os dispositivos de Coluna de Água Oscilantes, CAO, (na notação inglesa: *Oscillating Water Column* - OWC) consistem em estruturas ocas parcialmente submersas, que se encontram abertas para o mar abaixo da superfície livre da água, figura 2.4.

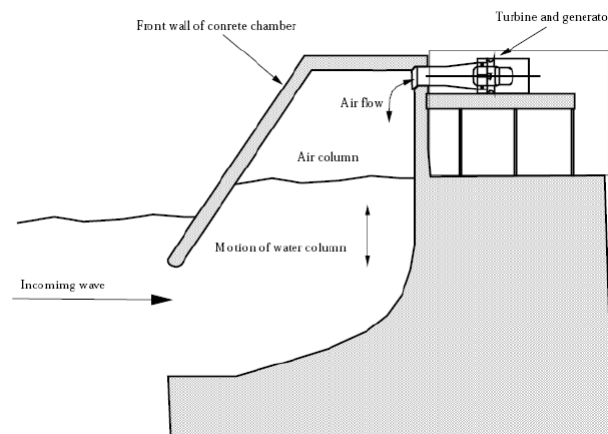


Figura 2.4: Esquema representativo de um dispositivo de CAO. Adaptado de [IEA, 2009].

Quando as ondas atingem as imediações da câmara da CAO, ver figura 2.4, e se propagam para o seu interior, a superfície livre da água interior oscila verticalmente, comprimindo o ar no interior na fase de subida e expandindo o ar no interior na fase de descida. Este ar é expelido ou sugado a partir do orifício da turbina, sendo o grupo turbina/gerador, o responsável pela geração de energia eléctrica. Normalmente são utilizadas turbinas bidireccionais (turbinas que mantêm o mesmo sentido de rotação, independentemente do sentido do escoamento) para a produção de electricidade, como a turbina *Wells*¹, de modo a se aproveitar de uma forma eficiente a bidireccionalidade do fluxo de ar.

A CAO é a tecnologia mais investigada até à presente data com protótipos instalados em vários países. Estes sistemas podem ser encontrados *onshore* e *nearshore*, podendo ser construídos directamente na linha costeira ou integrados em quebra-mares, em molhes, etc., ou *offshore* como estruturas flutuantes.

2.2.1 Estruturas Fixas

As CAO instaladas na linha costeira ou em estruturas como os quebra-mares têm a vantagem de serem de fácil instalação, manutenção, e não requerem amarrações como os dispositivos flutuantes. Os dispositivos próximos da costa, instalados em estruturas,

¹Turbina desenvolvida na década de 70 pelo Professor Allan Wells, da Queen's University of Belfast do Reino Unido.

como por exemplo o quebra-mar, também têm a vantagem de estarem localizados em zonas onde a energia de agitação marítima é superior, pois a agitação é menos afectada pelos efeitos de atrito do fundo do mar.

As instalações em estruturas como os quebra-mares ou molhes são um tipo particular da utilização da tecnologia CAO que importa referir, uma vez que possibilita a integração de CAO em estruturas que são construídas com outros objectivos, que não a extracção da energia das ondas. Estas estruturas (quebra-mares, molhes, etc.) encontram-se espalhadas por toda a costa. Esta integração é muito positiva, uma vez que permite que exista uma partilha de custos entre as estruturas e a co-existência de várias actividades, como a extracção de energia e a protecção da costa por exemplo. Existem vários projectos com estas características, como o *Trivandrum* na Índia e *Sakata* no Japão, figura 2.5. Além das vantagens referidas anteriormente, é de referir também a melhoria das condições hidrodinâmicas das estruturas como os quebra-mares ou molhes, pois parte da energia incidente é absorvida em vez de ser reflectida ou dissipada pela sua superfície, logo a força das ondas incidentes não está a ser toda aplicada contra o quebra-mar ou molhe estando parte dela a ser utilizada pela CAO reduzindo assim a carga aplicada no quebra-mar ou molhe [da Silva Pereira, 2010].



(a) Projecto *Sakata* no Japão.



(b) Projecto *Trivandrum* na Índia.

Figura 2.5: Exemplos de dispositivos de Coluna de Água Oscilante *nearshore* fixos em estruturas. Adaptado de [da Silva Pereira, 2010].

Dispositivos de CAO em estruturas fixas têm sido instalados um pouco por todo o mundo, por exemplo: na Noruega (em Tofteshallen, em 1985), no Japão (em Sakata, em 1990), na Índia (em Vizhinjam, em 1990), em Portugal (no Pico, Açores, em 1999), no Reino Unido (na Ilha Islay, Escócia, em 2000) e na Austrália (em Port Kembla, em 2005) [Cruz and Sarmiento, 2004, Falcão, 2009]. Os dois exemplos actuais que melhor ilustram os dispositivos de CAO em estruturas fixas são a Central Piloto Europeia da Ilha do Pico nos Açores, Portugal, e a Central LIMPET na Ilha de Islay, Escócia, que são descritos de seguida.

2.2.1.1 Central Piloto Europeia da Ilha do Pico

A Central Piloto Europeia da Ilha do Pico, figura 2.6, está localizada na Ilha do Pico nos Açores, em Portugal, e tem uma potência instalada de 400 kW utilizando uma turbina *Wells*. Em [Brito-Melo et al., 2002] é feita uma análise numérica da influência da turbina *Wells* na performance da Central do Pico. Esta CAO foi desenvolvida entre 1995 e 1999 por uma equipa europeia coordenada pelo Instituto Superior Técnico (IST), e obteve a colaboração do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI), e ainda de duas universidades estrangeiras: a *Queen's University of Belfast*, do Reino Unido e a *University College Cork*, da Irlanda [Falcão and Pontes, 1997, WaveEnergyCentre, 2004].



Figura 2.6: Central Piloto Europeia da Ilha do Pico - Vista lateral. Adaptado de [Falcão, 2009].

Os testes na central do Pico iniciaram-se no verão de 1999 e estenderam-se, com interrupções significativas, até 2001, em resultado de deficiências várias, sobretudo ao nível do equipamento mecânico [Falcão and Pontes, 1997]. Devido a estes danos, a central passou por um processo de recuperação entre os períodos de 2003 e 2006, no âmbito das actividades do Centro de Energia das Ondas [Cruz and Sarmento, 2004, Falcão and Pontes, 1997].

Esta central foi a primeira no mundo a introduzir eletricidade produzida pela conversão de energia das ondas na rede eléctrica, embora tal facto tenha ocorrido apenas pontualmente durante a fase de ensaios, e a produção foi bastante inferior ao esperado [Falcão and Pontes, 1997]. A experiência adquirida neste projeto constituiu uma contribuição importante para o desenvolvimento de outros projectos na área da energia das ondas. Espera-se a recuperação da central com alterações no projecto inicial [da Silva Pereira, 2010].

2.2.1.2 Central LIMPET

A Central LIMPET (*Land Installed Marine Power Energy Transmitter*), está localizada na Escócia na Ilha de Islay, figura 2.7a, foi o primeiro dispositivo de conversão de energia das ondas a ser explorado comercialmente no Reino Unido - operacional desde novembro de 2000 estando conectado ao sistema eléctrico britânico [Boake et al., 2002]. Foi desenvolvida por uma empresa escocesa, a *Wavegen*², em conjunto com a *Queen's University of Belfast*, o IST e a Comissão Europeia.

Esta central apresentou um método de construção diferente, que visa tanto a redução dos custos de implantação como a facilidade de instalação. A central foi construída num precipício rochoso, a escavação da rocha foi realizada a partir da costa deixando uma parede de rocha do lado do mar, que só foi removido no fim da construção, permitindo que a construção da central fosse em seco, ver figura 2.7b. Esta central está equipada com duas turbinas tipo *Wells* com 2.6 metros de diâmetro e 250 kW de potência cada uma, produzindo um total de 500 kW [Folley et al., 2006]. Em [Folley et al., 2006] é feita uma comparação entre os dados teóricos e os obtidos no teste do modelo da turbina *Wells* instalada na Central LIMPET.

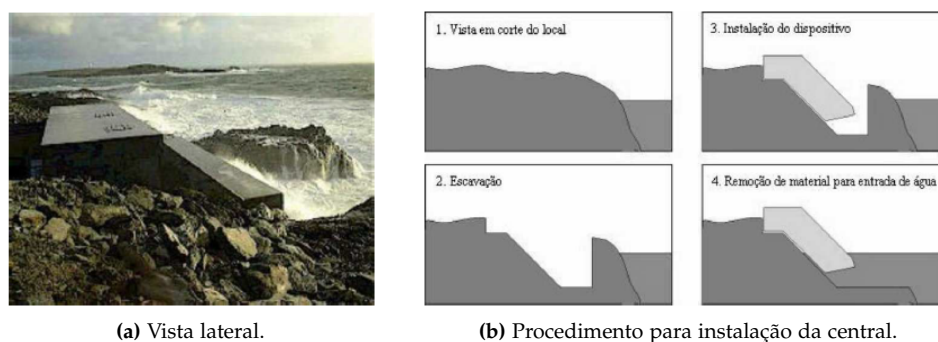


Figura 2.7: Central LIMPET. Adaptado de [Boake et al., 2002].

2.2.2 Flutuante

A tecnologia de CAO flutuante apresenta o mesmo método de funcionamento da CAO em estrutura fixa, mas permite aproveitar o maior recurso que existe ao largo, onde as profundidades são maiores e conseqüentemente existe menor dissipação de energia devido ao fundo. Geralmente a instalação deste tipo de tecnologia pressupõe uma profundidade superior a 40 ou 50 metros.

Dependendo da tecnologia a extracção pode ser feita em uma ou várias colunas de água oscilante, e em alguns sistemas é até possível uma construção modular, isto é,

²<http://www.wavegen.co.uk/>

que permite a utilização da plataforma flutuante para múltiplos objectivos.

Um dispositivo deste tipo já testado é o *Mighty Whale*, figura 2.8, que foi desenvolvido pelo Centro Tecnológico de Ciências Marítimas do Japão (JAMSTEC³), que depois de realizar testes em tanque passou para a construção de um protótipo que foi instalado no Japão, na baía de *Gokasho*, em 1998. Trata-se de um dispositivo flutuante com cerca de 400 toneladas, com uma potência de 110 kW e foi instalado a uma profundidade de 40 m. No entanto o dispositivo demonstrou uma baixa eficiência, o que contribuiu para a paragem da operação do mesmo antes do fim previsto [André, 2010, da Silva Pereira, 2010].



Figura 2.8: CAO flutuante *Mighty Whale*. Adaptado de [da Silva Pereira, 2010].

Uma empresa Australiana, a *Oceanlinx*⁴, concebeu um novo tipo de CAO. Este dispositivo para instalação ao largo da costa (*nearshore*), utiliza uma parede parabólica que tem a propriedade de concentrar as ondas incidentes para a CAO, ver figura 2.9. Este dispositivo encontra-se instalado ao largo da costa de *Port Kembla*, uma localidade Australiana, desde Fevereiro de 2010. Esta central CAO tem uma potência nominal de 300 kW e fornece energia eléctrica à rede local [André, 2010, Krishna, 2009].

³<http://www.jamstec.go.jp/e/>

⁴<http://www.oceanlinx.com>



Figura 2.9: CAO flutuante da Oceanlinx. Adaptado de [Krishna, 2009].

2.3 Corpos Oscilantes

Os Corpos Oscilante (na notação inglesa: *Oscillating Body Systems*) são uma tecnologia que existe em grande variedade. Este tipo de dispositivos visa o aproveitamento da maior quantidade de energia disponível em águas profundas, tipicamente mais de 40m de profundidade. Dentro deste modo de funcionamento podemos ter ainda duas grandes categorias: as estruturas flutuantes e as estruturas submersas [Falcão, 2009]. Dentro de cada uma destas estruturas podemos ainda classificar o equipamento pelo tipo de movimento a partir da qual é possível extrair energia, que pode ser essencialmente de translação ou de rotação [da Silva Pereira, 2010].

Estes dispositivos acarretam um desafio tecnológico mais elevado. O seu desenvolvimento enfrenta obstáculos como o acesso à manutenção dos dispositivos, transferência para terra da energia eléctrica produzida e os sistemas de amarração [Falcão, 2009].

2.3.1 Flutuantes

2.3.1.1 Translação

O funcionamento de um sistema de absorção de translação assenta no movimento ascendente e descendente que as ondas provocam no corpo flutuante à superfície. Este corpo está em movimento em relação a outro que pode estar fixo no fundo do mar ou em movimento [da Silva Pereira, 2010]. Este tipo de dispositivos é muitas vezes designado de sistemas de absorção pontual (em notação inglesa: *point absorber*) uma vez que as suas dimensões horizontais são muito inferiores ao comprimento da onda incidente [Falcão, 2009].

2.3.1.1.1 Sistema com um corpo oscilante

O sistema de absorção pontual mais simples é baseado em um modelo que consiste em uma bóia ligada a um referencial fixo que pode ser o fundo do mar ou um corpo assente no fundo do mar.

Um exemplo deste tipo de dispositivos mais simples é o *Norwegian buoy*, figura 2.10, no qual o sistema PTO estava assente no fundo do mar e utilizava uma turbina de ar. Este dispositivo foi testado no fiorde de *Trondheim* em 1983 [Budal et al., 1982].



Figura 2.10: Corpo oscilante *Norwegian buoy* em 1983. Adaptado de [Falcão, 2009].

Um outro exemplo baseado neste princípio foi testado na Dinamarca em 1990 no qual o PTO também estava assente no fundo e era o movimento da bóia acoplada que permitia a extracção da energia, através da utilização de uma bomba hidráulica que fornecia água a alta pressão a uma turbina hidráulica [da Silva Pereira, 2010, Falcão, 2009].

2.3.1.1.2 Sistema com dois corpos oscilantes

O conceito anterior de um único corpo oscilante em relação a um referencial fixo no fundo do mar pode apresentar limitações devido às grandes distâncias entre a superfície livre e o fundo do mar e devido às variações impostas pelas marés que podem originar dificuldades adicionais à sua operação. Uma solução para se ultrapassar estes constrangimentos foi utilizar-se sistemas que utilizam vários corpos oscilantes, onde a energia é convertida através do movimento relativo entre dois corpos oscilantes [Falcão, 2009]. A hidrodinâmica para um sistema com dois corpos oscilantes foi teoricamente

analisada em [Falnes, 1999]. Exemplos deste tipo de dispositivos são o *IPS*, o *Aquabuooy*, o *Wavebob* e o *Powerbuoy*.

O *IPS Bouy*, figura 2.11, foi um projecto desenvolvido na Suécia pelas empresas *Interproject Service AB* e *Technocean* e consiste em uma bóia à superfície ligada rigidamente a um tubo vertical submerso aberto nas duas extremidades que contém um pistão que está ligado ao sistema de PTO no casco da bóia [da Silva Pereira, 2010, Falcão, 2009].



(a) Fotografia do *IPS*.

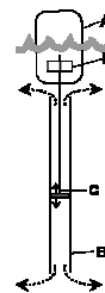
Legenda:

A – Flutuador;

B – Tubo de aceleração;

C – Pistão;

D – Gerador;



(b) Esquema do *IPS*.

Figura 2.11: Corpo oscilante *IPS*. Adaptado de [André, 2010, da Silva Pereira, 2010].

Através do esquema da figura 2.11b é possível compreender melhor este dispositivo. À medida que as ondas fazem oscilar o flutuador A, o tubo B movimenta-se verticalmente relativamente à coluna de água no seu interior. Este movimento faz com que o pistão C, que se encontra dentro do tubo B, se mova juntamente com a coluna de água, relativamente ao resto da estrutura. Este movimento de bombagem é mecânico ou hidráulicamente transformado em um movimento de rotação que acciona o gerador D.

O *AquaBuOY*, figura 2.12, foi desenvolvido em 2000 e tem um conceito semelhante ao *IPS Bouy* mas este apresenta duas mangueiras no seu interior para produzir um fluxo de água a alta pressão que acciona uma turbina *Pelton* [Weinstein et al., 2004].

O *Wavebob*, figura 2.13, consiste em um flutuador interligado por veios a um corpo submerso. O deslocamento relativo entre os dois corpos criado pelo movimento oscilatório das ondas é responsável pela geração de energia eléctrica. Este dispositivo tem a possibilidade de se adaptar automaticamente às condições do mar, maximizando a potência útil fornecida à rede [André, 2010, Krishna, 2009].

A *Ocean Power Technologies*, uma empresa americana, desenvolveu o *Powerbuoy*, figura 2.14. A bóia tem a forma de um disco e o movimento entre ela e o corpo cilíndrico adjacente é convertido através de um PTO hidráulico em energia eléctrica [Falcão, 2009]. Um protótipo de 40 kW sem ligação à rede foi colocado em Setembro de 2008 na costa de *Santõna*, no norte de Espanha. A empresa está a preparar-se para entrar na fase de comercialização.



Figura 2.12: Corpo oscilante AquaBuOY. Adaptado de [da Silva Pereira, 2010].

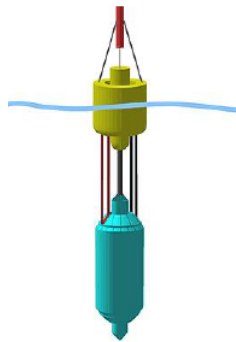


Figura 2.13: Corpo oscilante Wavebob. Adaptado de [da Silva Pereira, 2010].



(a) Fotografia do Powerbuoy em funcionamento.



(b) Fotografia do Powerbuoy fora de água.

Figura 2.14: Corpo oscilante Powerbuoy. Adaptado de [da Silva Pereira, 2010].

2.3.1.2 Rotação

Neste tipo de dispositivos a extração de energia está associada a um movimento de rotação em vez do movimento de translação que acontecia no caso anterior. Existem vários exemplos deste método de extração, neste caso as tecnologias diferem um pouco mais que no caso anterior.

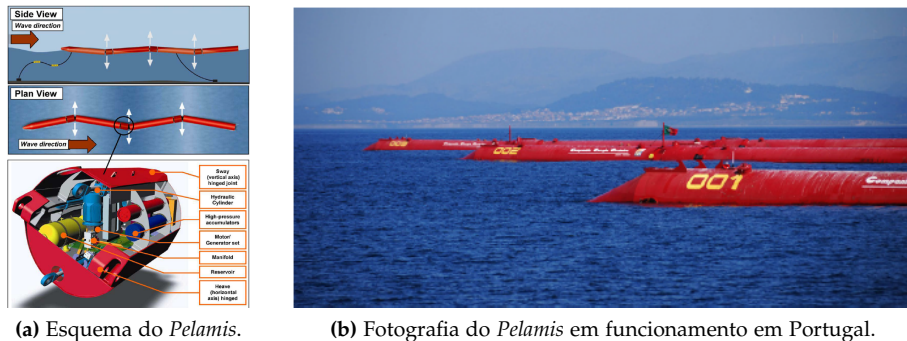
Um dos conceitos propostos é o *The Duck*, figura 2.15, é desenvolvido pela Universidade de Edimburgo desde dos anos 70 do século passado. Consiste em um equipamento que utiliza um PTO hidráulico com óleo que é activado através do movimento provocado pelas ondas nos giroscópicos que o dispositivo possui. Este dispositivo já foi alterado diversas vezes tendo em vista a sua optimização e em [Thorpe, 1999] são descritas as mudanças feita entre 1983 e 1998. As alterações feitas melhoraram o rendimento previsto possibilitando uma diminuição de custos bastante acentuada.



Figura 2.15: Esquema do corpo oscilante *The Duck*. Adaptado de [da Silva Pereira, 2010].

O *Pelamis* foi desenvolvido no Reino Unido, figura 2.16, e é composto por vários cilindros horizontais ligados entre si por articulações. O movimento oscilatório provocado pela agitação é resistido por cilindros hidráulicos que bombeiam óleo a alta pressão para motores hidráulicos que, por sua vez, accionam os geradores. A electricidade produzida é transportada para terra através de cabos submersos. O equipamento é instalado com amarrações que permitem um posicionamento longitudinal relativamente à direcção das ondas incidentes. Este sistema tem 180 metros de comprimento e 4 metros de diâmetro com uma potência de 750 kW. Após o teste com diferentes protótipos a diferentes escalas, o *Pelamis* foi testado em tamanho real em *Orkney* no Mar do Norte em 2004. Em 2005 um consórcio português encomendou três equipamentos destes que foram para Peniche, em 2006, para montagem. A instalação foi feita ao largo da Póvoa de Varzim no entanto os resultados não foram os esperados e o equipamento não resistiu às duras condições impostas pelo Atlântico [da Silva Pereira, 2010, Falcão, 2009, Henderson, 2005]. Em [Henderson, 2005] é descrito o funcionamento do sistema PTO do *Pelamis*.

O *McCabe Wave Pump*, figura 2.17, é um dispositivo que apresenta semelhanças conceptuais com o *Pelamis*. O *McCabe Wave Pump* foi concebido por *Peter McCabe* em 1980 e consiste em três pontões rectangulares de aço ligados entre si dispostos longitudinalmente relativamente à direcção das ondas incidentes. O movimento rotativo relativo



(a) Esquema do Pelamis.

(b) Fotografia do Pelamis em funcionamento em Portugal.

Figura 2.16: Corpo oscilante Pelamis. Adaptado de [Falcão, 2009, Henderson, 2005].

entre os pontões é convertido em energia eléctrica através de um sistema hidráulico [da Silva Pereira, 2010, Falcão, 2009]. Um protótipo deste dispositivo foi instalado na costa de *Kilbaha* na Irlanda em 1996 [Falcão, 2009].

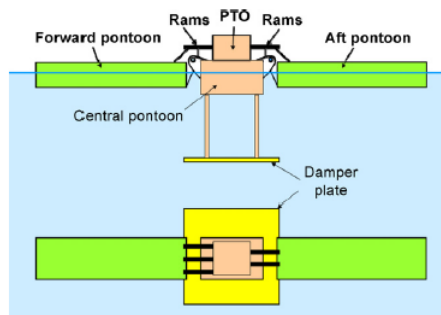


Figura 2.17: Esquema do corpo oscilante McCabe Wave Pump. Adaptado de [da Silva Pereira, 2010].

O *PS Frog Mk 5*, figura 2.18, foi desenvolvido na Universidade de *Lancaster* a partir de 1985. Em [McCabe et al., 2006] está descrito o desenvolvimento deste dispositivo. O *PS Frog Mk 5* consiste em uma pá gigante flutuante ligada a um cilindro, que funciona como lastro, que permite um tipo de movimento rotacional. A extracção de energia é feita através de uma massa deslizante que se encontra dentro do dispositivo acima do nível de água, ver figura 2.18a. O sistema de PTO utilizado neste dispositivo é um sistema hidráulico a óleo ligado a um acumulador e posteriormente a um gerador eléctrico. A produção deste dispositivo é feita através do deslocamento de uma massa deslizante dentro deste, no entanto, a forma exterior é extremamente importante pois é esta que permite a produção de energia e por isso foi bastante analisada em [McCabe et al., 2006].

O *Searev*, figura 2.19, foi desenvolvido pela Escola Central de Nantes e cujo funcionamento baseia-se no movimento rotacional de um cilindro em relação à estrutura

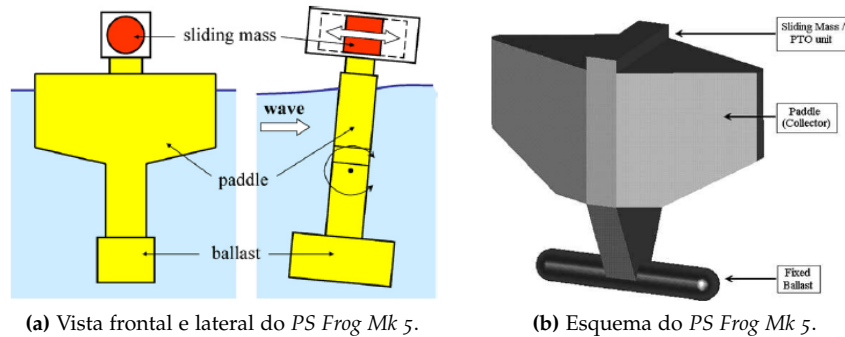


Figura 2.18: Corpo oscilante *PS Frog Mk 5*. Adaptado de [Falcão, 2009, McCabe et al., 2006].

envolvente. O centro de gravidade do cilindro não está centrado o que resulta num movimento pendular que através de um sistema de PTO hidráulico activa um gerador eléctrico [da Silva Pereira, 2010]. As componentes hidráulicas, mecânicas e eléctricas deste dispositivo e do *PS Frog Mk 5* encontram-se no interior da estruturas estando abrigadas da acção do mar.

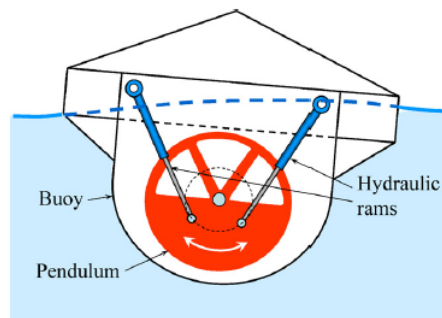


Figura 2.19: Esquema do corpo oscilante *Searev*. Adaptado de [Falcão, 2009].

2.3.2 Submersos

2.3.2.1 Translação

O *Archimedes Wave Swing (AWS)*, figura 2.20, é um sistema de absorção pontual totalmente submerso e o conceito emergiu em 1994 pela companhia *Teamwork Technology B. V.* O AWS é constituído por uma câmara cilíndrica assente no fundo e um cilindro superior flutuante. Conforme as ondas passam o flutuador sobe e desce conforme está na cava ou na crista da onda, o movimento é então devido à variação de pressão na coluna de água em cima do flutuador, como é possível verificar na figura 2.20a [da Silva Pereira, 2010]. Uma abordagem do funcionamento e optimização da

extracção de energia do AWS com maior pormenor pode ser encontrada em [Valério et al., 2007] e [Cruz and Sarmento, 2006].

Um ano depois da companhia ter tido a ideia, já estava a ser testado um modelo à escala de 1:20. Depois de muitos testes o desenho do AWS ficou completo e começou a ser montado em 1999 na Roménia. Portugal foi depois escolhido para a fase de instalação do protótipo e em 2001 foi feita a primeira tentativa de submersão do dispositivo no entanto ocorreram problemas de estabilidade e a operação foi interrompida. Em 2005 o dispositivo foi submerso tendo uma potência de 2 MW [da Silva Pereira, 2010].

O facto de este dispositivo ser totalmente submerso acarreta vantagens, tais como, uma maior aceitação pública pela ausência de impactos visuais e uma menor vulnerabilidade do equipamento a tempestades [da Silva Pereira, 2010].

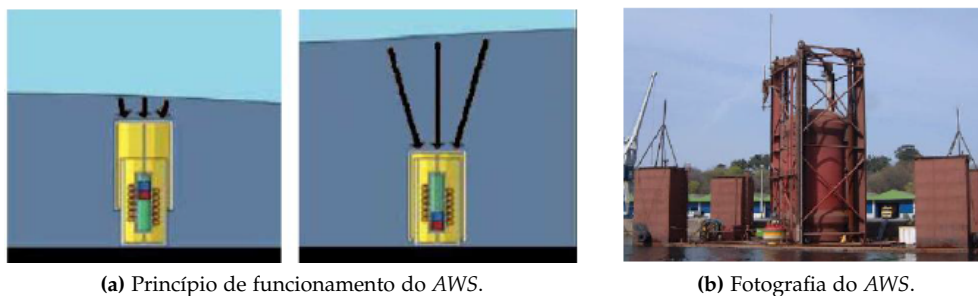


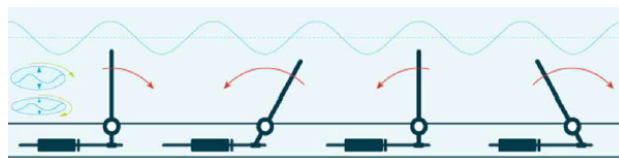
Figura 2.20: Corpo oscilante submerso Archimedes Wave Swing (AWS). Adaptado de [da Silva Pereira, 2010].

2.3.2.2 Rotação

Este tipo de dispositivos são projectados para serem utilizados perto da costa, a profundidades que não ultrapassem os 15 metros, e assentes no fundo. O princípio de funcionamento baseia-se no movimento das ondas nas partículas de água que à superfície executam um movimento circular mas à profundidade que estes equipamentos se encontram é mais alongada executando um movimento elíptico. Este movimento elíptico vai ser utilizado para a extracção de energia através dos dispositivos.

O WaveRoller, figura 2.21, é um exemplo deste tipo de dispositivos que já foi testado inclusivamente em Portugal (Peniche). Este consiste em uma placa vertical totalmente submersa que roda em torno de um eixo horizontal existente na sua base que está ancorada no fundo do mar. O movimento da placa para a frente e para trás causado pelas ondas, vai, através de um sistema de conversão hidráulico, permitir a produção de electricidade, ver figura 2.21a.

Este sistema tem a capacidade de poder ser interligado em módulos, sendo possível a disposição de vários componentes na mesma zona de exploração. Assim, a produção de electricidade pode continuar mesmo ocorrendo a manutenção de algum módulo. O



(a) Esquema do WaveRoller.



(b) Fotografia do WaveRoller.

Figura 2.21: Corpo oscilante submerso WaveRoller. Adaptado de [André, 2010, da Silva Pereira, 2010].

WaveRoller foi testado à escala de 1:3 no Equador e em *Orkney* na Escócia e alcançou a fase de testes em tamanho real em Portugal [da Silva Pereira, 2010].

O *Oyster*, figura 2.22, é um dispositivo com um modo de funcionamento semelhante ao anterior, no entanto o modo como é produzida a energia eléctrica é totalmente diferente uma vez que este utiliza uma turbina *Pelton*. Este equipamento funciona com uma bomba de água em tamanho grande que bombeia a água a alta pressão para terra, através de pistões hidráulicos, para ser turbinada. Depois de em *Orkney* na Escócia ter sido instalado o *Oyster 1*, já está planeada a instalação de um dispositivo designado *Oyster 2* que consiste em três dispositivos ligados com uma potência de 2.5 MW [da Silva Pereira, 2010].

**Figura 2.22:** Fotografia do *Oyster*. Adaptado de [da Silva Pereira, 2010].

2.4 Galgamento

O galgamento (em notação inglesa: *Overtopping*) é uma forma diferente de efectuar a conversão da energia contida nas ondas. Esta consiste em capturar a água que está na zona da crista da onda colocando-a num reservatório cuja cota é superior à da

superfície livre média da água circundante. Esta energia potencial é depois convertida em electricidade através da utilização de turbinas [da Silva Pereira, 2010, Falcão, 2009]. Este tipo de tecnologia pode ser utilizado em dispositivos de estruturas fixas ou flutuantes.

2.4.1 Estrutura Fixa

Em *Toftestallen* desde 1985 está instalado o *Tapchan* - *Tapered Chanel Wave Power Device* - como uma capacidade de 350 kW, ver figura 2.23. Este foi desenvolvido na Noruega nos anos 80. O colector está cavado na rocha, ver figura 2.23b, e vai estreitando de modo a concentrar as ondas incidentes até ao reservatório (com cerca de 3 metros de altura neste protótipo) [Falcão, 2009]. O reservatório deve ser grande o suficiente para suavizar as flutuações do fluxo de água que vem do colector, este protótipo apresenta uma área superficial de 8500 m², de modo a que a turbina *Kaplan* instalada funcione correctamente [da Silva Pereira, 2010, Falcão, 2009].

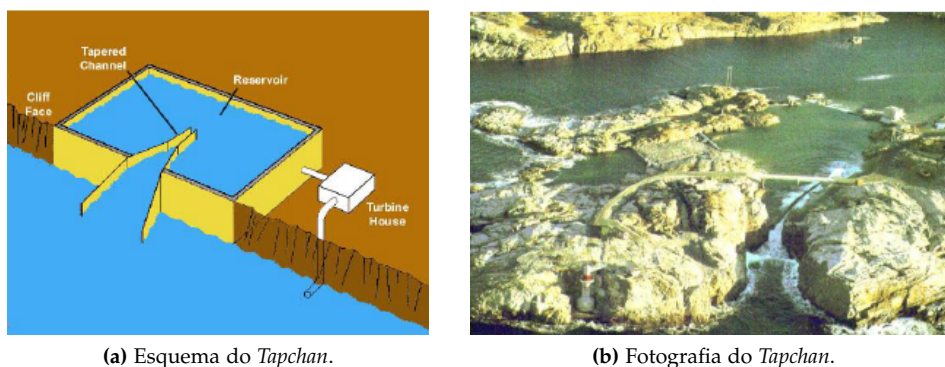


Figura 2.23: Dispositivo de galgamento *Tapchan*. Adaptado de [da Silva Pereira, 2010].

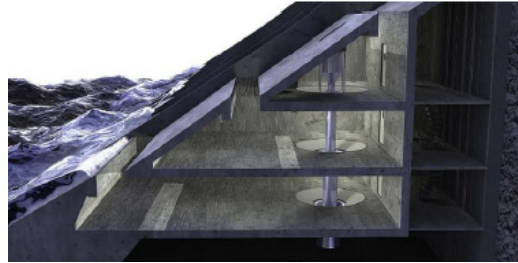
O *Seawave Slot-Cone Generator (SSG)* encontra-se instalado na ilha de *Kvitsoy* na Noruega em um molhe, ver figura 2.24a. Este utiliza câmaras sobrepostas acima do nível da superfície livre de água de modo a captar a água a diferentes alturas, ver figura 2.24b. De seguida a água é direccionada para uma turbina que converte a energia potencial da água em energia mecânica que acciona um gerador, produzindo electricidade. Este dispositivo apresenta 4 turbinas *Kaplan* e uma capacidade de produção de 163 kW. Em [Margheritini et al., 2008] este dispositivo é descrito com maior detalhe.

2.4.2 Flutuante

O *Wave Dragon*, figura 2.25, é um dispositivo flutuante para aplicação *offshore* que foi desenvolvido na Dinamarca.



(a) Fotografia do SSG.



(b) Esquema lateral do SSG.

Figura 2.24: Dispositivo de galgamento SSG. Adaptado de [Margheritini et al., 2008].



Figura 2.25: Fotografia do *Wave Dragon*. Adaptado de [Tedd and Kofoed, 2008].

O princípio de funcionamento deste dispositivo, ver figura 2.26a, consiste na acumulação de água em um reservatório sobre-elevado relativamente ao nível médio da água do mar. Esta água vai atravessar uma ou mais turbinas *Kaplan*. O *Wave Dragon* tem um reservatório a partir do qual saem duas asas, ver figura 2.26b, que servem para concentrar as ondas incidentes e permitir que o dispositivo actue numa banda de frequências mais larga. A flutuação deste dispositivo é conseguida através de câmaras-de-ar onde sistemas de pressurização de ar se encontram de modo a gerir a altura a que a estrutura se encontra. O dispositivo é mantido no local por amarrações em catenária e, quando o estado do mar é muito elevado, as ondas ultrapassam a plataforma sem a danificar.

O desenvolvimento do *Wave Dragon* está referido em [Kofoed et al., 2006]. Diferentes estudos foram realizados sobre este e diversas conclusões relativamente a pormenores operacionais foram tiradas e estão descritas em [Tedd and Kofoed, 2008], [Kofoed et al., 2006], [Beels et al., 2010a] e [Beels et al., 2010b] que referem a medição, análise e posterior obtenção de modelos para este dispositivo.

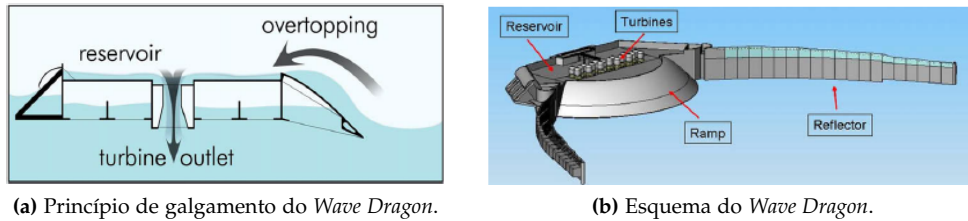


Figura 2.26: Princípio de funcionamento e esquema do dispositivo de galgamento flutuante Wave Dragon. Adaptado de [Tedd and Kofoed, 2008].

2.5 Power Take-Off (PTO)

O mecanismo de conversão de energia das ondas (em notação inglesa: *Power Take-Off* (PTO)) é utilizado para converter o movimento do dispositivo causado pela agitação marítima, em energia eléctrica que posteriormente será fornecida à rede.

O objectivo final dos sistemas de aproveitamento de energia das ondas é o fornecimento de electricidade à rede, tendo como grande desafio a transferência de um movimento linear ou rotativo ao gerador considerando a grande variabilidade do recurso.

O método de conversão de energia varia de dispositivo para dispositivo, como foi possível verificar nos dispositivos descritos anteriormente. O esquema da figura 2.27 apresentado em [Drew et al., 2009] indica três métodos de PTO após a interacção hidrodinâmica da onda com o equipamento.

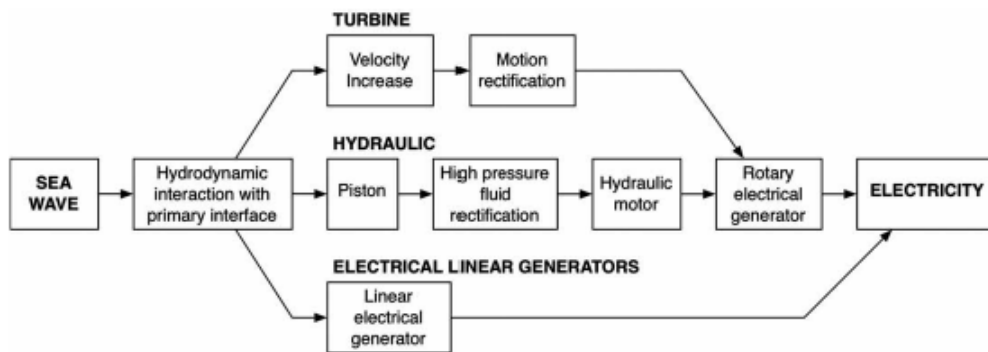


Figura 2.27: Esquema com os diferentes PTO. Adaptado de [Drew et al., 2009].

A utilização de turbinas, de sistemas hidráulicos ou de geradores são alguns dos métodos para a obtenção de electricidade. Dentro destes métodos gerais existe uma grande variedade de estratégias que estão em constante desenvolvimento e aperfeiçoamento. Em seguida é feita uma breve descrição de alguns métodos PTO tendo em

conta a figura 2.27.

Uma revisão detalhada de equipamentos mecânicos de PTO para sistema de conversão de energia das ondas pode ser encontrada em [Salter et al., 2002].

2.5.1 Turbinas

A utilização de turbinas acopladas a um gerador é uma das formas utilizadas para a conversão na qual o fluido a ser turbinado pode ser ar ou água.

2.5.1.1 Turbinas a Ar

As turbinas de ar têm sido a solução de PTO mais comum adoptada nos sistemas de CAO [Conde and Gato, 2008]. As mais comuns são as turbinas *Wells* [Brito-Melo et al., 2002] e *Denniss-Auld*. Estas convertem a energia pneumática obtida a partir do escoamento de ar em energia mecânica de rotação. São turbinas auto-rectificadoras, o seu sentido de rotação é independente da direcção do escoamento de ar. Esta particularidade faz com que estas turbinas se apresentem como boas candidatas à sua utilização em dispositivos de CAO, pois com a oscilação da pressão no interior da câmara pneumática o sentido do fluxo inverte-se. Esta propriedade também permite o seu funcionamento em uma gama de caudais mais elevada. Apesar da importância deste factor, e tendo em conta a variabilidade do recurso, as turbinas apresentam baixos rendimentos.

A turbina *Wells* foi desenvolvida na Universidade de *Belfast* e foi usada nas centrais do Pico e a *LIMPET* (descritas na secção 2.2.1) [Brito-Melo et al., 2002].

A turbina *Denniss-Auld* foi desenvolvida pela Universidade de *Sydney*, na Austrália, e tem como particularidade as pás se moverem de modo a optimizar o ângulo de ataque em relação ao fluxo. Este tipo de turbina está a ser utilizada no projecto de CAO denominado *Oceanlinx* (descrito na secção 2.2.2).

2.5.1.2 Turbinas Hidráulicas

As turbinas hidráulicas são utilizadas em dispositivos de galgamento, onde a água é acumulada em um reservatório para ser turbinada, ou em conjunto com sistemas de bombagem de água. São dois métodos completamente distintos de conversão apesar de ambos utilizarem turbinas hidráulicas e por isso existem diferentes tipos de turbinas hidráulicas que melhor se adequam a cada método.

As turbinas de baixa queda (apenas 3 a 4 metros de altura entre o nível médio da água do mar e a turbina) utilizadas nos dispositivos de galgamento, são na maioria dos casos turbinas *Kaplan*. Estas são as mais indicadas para este tipo de aplicação uma vez que o ângulo de passo das pás varia de modo a adaptar-se ao caudal em jogo,

aumentando a eficiência e contribuindo para uma utilização em gamas de caudais mais alargadas [André, 2010].

Turbinas de grande queda, nomeadamente turbinas *Pelton*, são utilizadas em alguns dos sistemas que geram energia a partir do princípio de bombagem de água, em alternativa aos motores hidráulicos, com a vantagem de utilizarem a água do mar, em vez de óleo hidráulico [Falcão, 2009].

2.5.2 Sistemas Hidráulicos

O sistema hidráulico, figura 2.28, é outra solução para a conversão de energia mecânica em energia eléctrica, apresentando como vantagem a boa capacidade de absorção de forças elevadas provocadas pelas ondas. Estes sistemas são particularmente adequados para converter energia de forças ou momentos muito grandes aplicados pelas ondas a corpos oscilantes que se movem lentamente [Falcão, 2009].

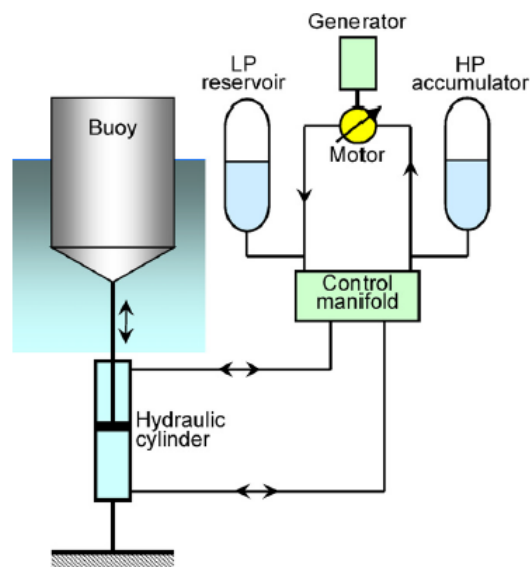


Figura 2.28: Esquema do PTO - Sistema Hidráulico. Adaptado de [Falcão, 2009].

O sistema hidráulico (fig. 2.28) consiste em um pistão, uma bomba hidráulica e um motor hidráulico. O movimento linear da onda actua no pistão movendo-o verticalmente, pressurizando um fluido hidráulico como água ou óleo, passando de seguida por uma bomba que alimenta o motor hidráulico. Nesta bomba hidráulica existe um sistema de acumulador de gás capaz de armazenar energia durante alguns períodos de ondas, o que permite suavizar a potência muito irregular absorvida pelas ondas. Por último este motor cria o movimento de rotação necessário à produção de

energia eléctrica através de um gerador. Em [Falcão, 2007] é possível entender com mais detalhe o funcionamento do sistema hidráulico acoplado a um corpo oscilante.

Este método apresenta como desvantagem as perdas ocorridas durante a bombagem e nas engrenagens do motor e o acesso ao sistema, nos dispositivos em alto mar. Como vantagens destacam-se a sua resistência e rentabilidade. São sistemas menos dispendiosos e a tecnologia é bastante conhecida.

O sistema hidráulico como PTO foi utilizado para equipar dispositivos como o *Wavebob*, *PowerBuoy*, *Pelamis* e o *WaveRoller* (descritos na secção 2.3).

2.5.3 Geradores

Os geradores lineares visam a obtenção de electricidade directamente da interacção hidrodinâmica, isto é, convertem directamente a energia das ondas em energia eléctrica. Estes utilizam um sistema de translação para a produção de energia eléctrica, em vez de um motor. Apresentando assim a vantagem de não ser necessário um sistema mecânico, como por exemplo uma turbina de ar ou um motor hidráulico. Possui menos partes móveis e é mais eficiente que um sistema hidráulico. No dispositivo *AWS* (descrito na secção 2.3.2) foi utilizado um gerador linear como PTO.

3

Modelação Matemática

3.1 Introdução

Desde do início do século 20, o homem tem vindo a pensar em como aproveitar a energia das ondas. Até agora, mais de alguns de milhares de patentes foram registadas [Cândido and Justino, 2007]. Para se conseguir ter o primeiro olhar sobre o desempenho do dispositivo, ferramentas analíticas e numéricas tem que ser utilizadas.

Um modelo é uma representação matemática simplificada de um sistema, cuja finalidade é permitir avaliar e simular o comportamento do sistema em estudo. Existe uma grande variedade de modelos matemáticos que permitem descrever a dinâmica de um corpo flutuante em diferentes estados de desenvolvimento (ver figura 3.1).

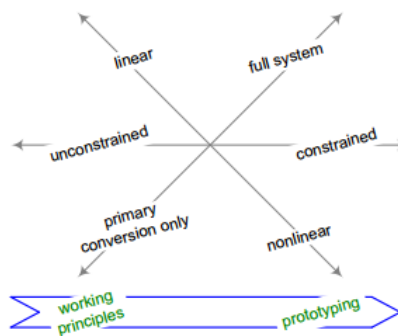


Figura 3.1: Desenvolvimento da modelação em diferentes fases do dispositivo (desde da fase inicial até a um modelo mais real). Adaptado de [Hals, 2010].

Na fase inicial da modelação de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas, os princípios de funcionamento do sistema podem muitas vezes ser avaliados considerando o sistema ideal, ou seja, pode-se admitir que o dispositivo tem uma dinâmica linear e sem restrições. Nesta caso, normalmente, são utilizados modelos

no domínio da frequência para ondas regulares e modelos estocásticos para ondas irregulares, onde se assume um comportamento linear do sistema de *power take-off* (PTO).

No entanto, uma análise no domínio da frequência não permite considerar uma configuração do sistema de PTO não linear, que será o cenário mais realista e que permitirá fazer uma análise mais adequada para a maioria dos dispositivos. Esta dificuldade pode ser ultrapassada por meio de análise no domínio do tempo. Os modelos no domínio do tempo permitem o cálculo de séries temporais para as variáveis que caracterizam o comportamento do dispositivo, podendo ser assumido um sistema de PTO não linear ou linear [Cândido and Justino, 2011].

Neste capítulo, inicialmente estudou-se a interação entre corpos oscilantes e as ondas e as forças aplicadas pelas ondas a um corpo flutuante, com base na literatura [Falnes, 2002]. Posteriormente, são apresentadas as equações necessárias para criar os modelos para simular e avaliar a dinâmica do corpo flutuante em estudo. São apresentadas as equações para o domínio da frequência para ondas regulares e para ondas irregulares e para o domínio do tempo (com o sistema PTO linear). O modelo para ondas irregulares é feito com base em um modelo estocástico. Uma vez que este trabalho baseia-se nos primeiros estudos realizados para o dispositivo apresentado, o objectivo é descrever o movimento do corpo flutuante sob a acção de ondas no domínio da frequência para ondas regulares e estocasticamente para ondas irregulares. As equações no domínio do tempo são apresentadas para permitir obter as equações no domínio da frequência, mas não são avaliadas neste estudo.

3.2 Interações Onda-Corpo

A primeira etapa quando se está a estudar a dinâmica de um corpo oscilante é criar um sistema de coordenadas de referência, sem o sistema de coordenadas seria impossível escrever as equações que descrevem o movimento oscilatório do corpo ou descrever as forças que actuam nesse corpo.

A posição do dispositivo é definida por um sistema de coordenadas cartesianas com origem no plano da superfície livre. Uma estrutura *offshore* que flutua livremente nas ondas do mar (que não se encontra ancorado ou fixo por amarração), normalmente, apresenta 6 graus de liberdade: 3 de translação e 3 de rotação [Falnes, 2002] (ver figura 3.2):

1. Avanço-Recuo (em notação inglesa: *surge*): movimento horizontal, longitudinal ao longo do eixo x ;
2. Deriva (em notação inglesa: *sway*): movimento horizontal, transversal ao longo do eixo y ;

3. Arfagem (em notação inglesa: *heave*): movimento vertical ao longo do eixo z ;
4. Balanço (em notação inglesa: *roll*): movimento de rotação em torno do eixo x ;
5. Cabeceio (em notação inglesa: *pitch*): movimento de rotação em torno do eixo y ;
6. Guinada (em notação inglesa: *yaw*): movimento de rotação em torno do eixo z .

Quando o movimento imposto ao corpo flutuante implica deslocamentos simultâneos em mais do que um grau de liberdade estes denominam-se de modos cruzados.

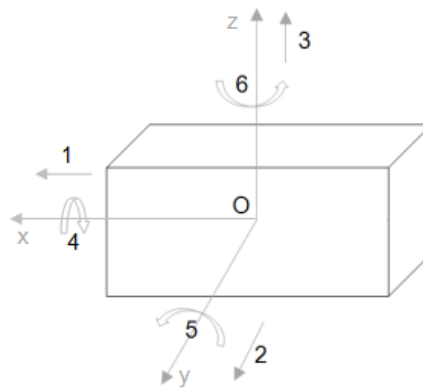


Figura 3.2: Nomenclatura utilizada para definir os graus de liberdade.

No caso em estudo, a posição do dispositivo está definida por um sistema de coordenadas cartesianas com origem no centro da circunferência que se encontra ao nível da superfície livre da água. O dispositivo apresenta 4 graus de liberdade, figura 3.3:

- O movimento horizontal x ;
- O movimento de rotação em torno do eixo dos yy , θ ;
- O movimento vertical z ;
- E o movimento que permite a produção de energia, o movimento da massa 1 segundo a coordenada l (coincidente com o eixo sobre o qual a massa 1 desliza).

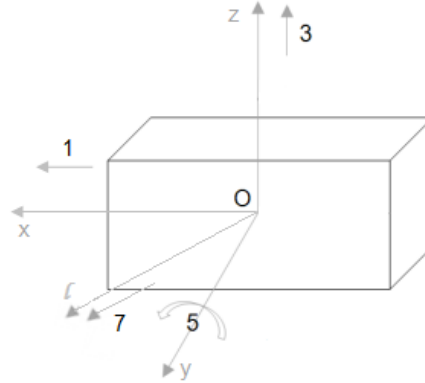


Figura 3.3: Nomenclatura utilizada para definir os graus de liberdade do dispositivo em estudo. Eixos x (movimento horizontal da bóia), y (movimento de rotação da bóia em torno deste eixo, θ) e z (movimento vertical da bóia) pertencentes a um referencial cartesiano centrado em $(0,0,0)$. O eixo l coincidente com o eixo sobre o qual a massa 1 desliza.

3.3 Equações do Movimento

Na modelação de sistemas dinâmicos é frequente considerar-se algumas simplificações que visam reduzir o esforço computacional, desenvolvendo modelos numéricos mais rápidos e simples, que permitam com alguma fiabilidade e de uma forma mais económica demonstrar os resultados obtidos em ensaios experimentais do sistema físico em escalas reduzidas, como por exemplo num tanque de ondas, [da Silva Moraes, 2009]. Assim, nesta análise desprezou-se os efeitos viscosos e de atrito, uma vez que segundo a teoria linear das ondas têm valor nulo porque o fluido é considerado perfeito.

Considere-se um corpo flutuante, livre, sem qualquer velocidade inicial, sob a acção de ondas regulares unidireccionais. De acordo com a teoria linear das ondas de superfície, quando o corpo está sintonizado com a onda incidente, mas sem estar em ressonância, as suas respostas (deslocamentos, velocidades e acelerações) a essas mesmas ondas terão a mesma ordem de grandeza da amplitude da onda incidente. Isto é, se as ondas incidentes forem sinusoidais, a resposta do corpo às ondas também é sinusoidal [Falnes, 2002].

Para descrever os principais factores que estão associados ao movimento oscilatório de um corpo oscilante é necessário recorrer à lei fundamental da dinâmica (segunda lei de Newton). Considerando um corpo oscilante com seis graus de liberdade (três de translação e três de rotação), o movimento do corpo rígido em cada grau de liberdade

ξ_j é dado pela equação do movimento [Falnes, 2002]:

$$m\ddot{\xi}_j(t) = f_{h,j}(t) + f_{m,j}(t) , \quad (3.1)$$

sendo m a massa do corpo, $\ddot{\xi}_j(t)$ a aceleração do corpo no grau de liberdade j , $f_{h,j}(t)$ a componente da força para o grau de liberdade considerado devido à pressão exercida pela água sobre a superfície do corpo imersa e $f_{m,j}(t)$ a força para o grau de liberdade considerado imposta pelo sistema de conversão de energia (PTO) no corpo.

Considerando o sistema hidrodinamicamente linear, isto é, com pequenas amplitudes de onda e pequenos movimentos do corpo, resulta [Falcão, 2007]:

$$f_{h,j} = f_{d,j} + f_{r,j} + f_{hs,j} , \quad (3.2)$$

em que $f_{d,j}$ é a força hidrodinâmica exercida pela onda sobre o corpo quando este se encontra imóvel, conhecida como a força ou momento de difracção ou excitação, $f_{r,j}$ é a força ou momento de radiação, ou seja, a força ou momento hidrodinâmico exercido pela água sobre o corpo quando este se move e na ausência de ondas incidentes e $f_{hs,j}$ é a força ou momento de restituição hidrostática exercida pela água sobre o corpo.

Para ondas regulares de frequência ω , a força ou momento de difracção ou excitação apresenta também uma variação sinusoidal com o tempo, de frequência igual à frequência das ondas incidentes [Falcão, 2007]. No caso de um sistema linear, isto é, onde as ondas incidentes são sinusoidais (regulares), a força de difracção ou excitação resulta:

$$f_{d,j}(t) = F_{D,j}e^{i\omega t} , \quad (3.3)$$

onde $F_{D,j}$ é amplitude complexa da força de difracção. Uma vez que o sistema é linear, F_d é proporcional à amplitude da onda incidente A_w e pode-se escrever:

$$|F_{d,j}| = \Gamma_j(\omega)A_w , \quad (3.4)$$

onde $\Gamma(\omega)$ é o coeficiente da força de excitação (parte real).

Para um sistema linear é convencional decompor a força ou momento de radiação

em:

$$f_r(t) = -A_{ji}(\omega)\ddot{x}_j - B_{ji}(\omega)\dot{x}_j, \quad (3.5)$$

onde $A_{ji}(\omega)$ é a massa adicional que representa o efeito de inércia da massa de água que é arrastada pelo movimento oscilatório do corpo e $B_{ji}(\omega)$ é o coeficiente de amortecimento de radiação e está associado às ondas produzidas pelo movimento oscilante do corpo. Estes coeficientes dependem da geometria do dispositivo e da frequência ω . Para geometrias simples (esferas, cilindros circulares), estes podem ser calculados analiticamente. Para geometrias mais complexas, como o dispositivo deste trabalho, utiliza-se *softwares* como o WAMIT.

Considerando que o mecanismo de conversão de energia (*Power Take-Off* - PTO), descrito de uma forma linear, é composto por um sistema de mola, coeficiente de amortecimento e massa (ver figura 3.4), a força imposta pelo sistema de conversão de energia, $f_{m,j}$, pode ser escrita na forma:

$$f_{m,j} = -K_L x_j - D_L \dot{x}_j, \quad (3.6)$$

onde $K_L x_j$ representa o efeito de mola (que pode ou não existir) e $D_L \dot{x}_j$ o efeito de amortecimento associado à extracção de energia, são ambos constantes no tempo.

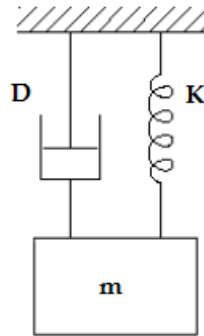


Figura 3.4: Esquema do sistema mola-amortecedor-massa. Adaptado de [Falnes, 1999]

A potência que o sistema PTO consegue extrair do movimento do dispositivo, ou que está disponível para o sistema PTO, apresenta uma componente activa¹ (D_L) e uma

¹ A potência activa é o valor médio da potência instantânea e corresponde por conseguinte à potência que é efectivamente transferida [Paiva, 2011].

componente reactiva² (K_L). A componente activa é a única que contribui para o valor médio da potência extraída ao corpo pelo sistema PTO, no entanto instantaneamente também se obtêm um valor reactivo. Normalmente, a maior parte dos sistemas PTO só apresentam uma componente dominante activa. A componente reactiva poderá também estar presente, mas se K_L tomar valores negativos significa que se tem que obter uma mola com um coeficiente de rigidez negativo, o que na prática é muito difícil de conseguir.

Outra implicação, traduz-se no facto que quando se considera que o sistema PTO é composto por D_L e K_L , significa que a força aplicada pelo sistema PTO ao dispositivo pode não estar em fase com a velocidade relativa deste. Isto significa, no caso em estudo, que actuando em K_L temos que a força aplicada pelo sistema PTO ao dispositivo se encontra desfasada da velocidade relativa entre a massa interna deslizante 1 e o restante dispositivo.

No caso do dispositivo em estudo, existem 4 (uma para cada grau de liberdade) equações que o governam:

- A equação respeitante ao equilíbrio das forças horizontais segundo a coordenada x que actuam no dispositivo;
- A equação respeitante ao equilíbrio das forças verticais segundo a coordenada z que actuam no dispositivo;
- A equação respeitante ao equilíbrio de momentos segundo a coordenada θ , em torno do eixo yy , que actuam no dispositivo;
- A equação respeitante ao equilíbrio das forças que actuam na massa 1, segundo l (ver fig. 3.3).

3.4 Modelo no Domínio do Tempo

A análise no domínio da frequência não permite considerar configurações para o sistema PTO não-lineares, que seria o cenário mais realista para a maioria dos dispositivos de energia das ondas. Esta dificuldade pode ser ultrapassada por meio de uma análise no domínio do tempo.

Um modelo no domínio do tempo permite o cálculo de séries temporais para as variáveis que caracterizam o comportamento do sistema de energia das ondas, e assumir um sistema PTO linear ou não-linear. Uma configuração não-linear de um sistema PTO pode consistir, por exemplo, num circuito hidráulico.

²A potência reactiva é o valor máximo da componente da potência que oscila entre o gerador e a carga, cujo valor médio é nulo, resultante da variação da energia eléctrica armazenada nos elementos capacitivos da impedância de carga [Paiva, 2011].

Este tipo de modelos permitem ter uma percepção da forma como um sistema de conversão de energia das ondas interage em mar real.

Neste caso, as equações apresentadas no domínio do tempo retratam a dinâmica do sistema em mar real mas com o sistema PTO linear.

As equações que descrevem o dispositivo no domínio do tempo resultam do equilíbrio: das forças horizontais x , das forças verticais z , dos momentos em torno do eixo yy que actuam no dispositivo e também do equilíbrio das forças que actuam na massa 1 segundo l , e são respectivamente:

$$(M_b + M_{m_1} + M_{m_2})\ddot{x}(t) + (I_{x\theta b} + I_{x\theta m_1} + I_{x\theta m_2})\ddot{\theta}(t) - M_{m_1}\ddot{l}(t) \cos \alpha = \hat{F}_{Dx} + \\ + (-A_{xx}\dot{x}(t) - B_{xx}\dot{x}(t)) + (-A_{xz}\dot{z}(t) - B_{xz}\dot{z}(t)) + (-A_{x\theta}\dot{\theta}(t) - B_{x\theta}\dot{\theta}(t)) , \quad (3.7)$$

$$(M_b + M_{m_1} + M_{m_2})\ddot{z}(t) + (I_{z\theta b} + I_{z\theta m_1} + I_{z\theta m_2})\ddot{\theta}(t) + M_{m_1}\ddot{l}(t) \sin \alpha = \hat{F}_{Dz} + \\ + (-A_{zz}\dot{z}(t) - B_{zz}\dot{z}(t)) + (-A_{zx}\dot{x}(t) - B_{zx}\dot{x}(t)) + (-A_{z\theta}\dot{\theta}(t) - B_{z\theta}\dot{\theta}(t)) + \\ - C_{zz}z - C_{z\theta}\theta , \quad (3.8)$$

$$(I_{\theta\theta b} + I_{\theta\theta m_1} + I_{\theta\theta m_2})\ddot{\theta}(t) + (I_{\theta z b} + I_{\theta z m_1} + I_{\theta z m_2})\ddot{z}(t) + (I_{\theta x b} + I_{\theta x m_1} + I_{\theta x m_2})\ddot{x}(t) = \\ \hat{F}_{D\theta} + (-A_{\theta\theta}\dot{\theta}(t) - B_{\theta\theta}\dot{\theta}(t)) + (-A_{\theta z}\dot{z}(t) - B_{\theta z}\dot{z}(t)) + (-A_{\theta x}\dot{x}(t) - B_{\theta x}\dot{x}(t)) + \\ - C_{\theta\theta}\theta - C_{\theta z}z , \quad (3.9)$$

e

$$M_{m_1}\ddot{l}(t) + M_{m_1}\ddot{z}(t) \sin \alpha - M_{m_1}\ddot{x}(t) \cos \alpha = -K_L l - D_L \dot{l}(t) . \quad (3.10)$$

onde $\ddot{x}(t)$, $\ddot{z}(t)$, $\ddot{\theta}(t)$ e $\ddot{l}(t)$ é aceleração para cada grau de liberdade, $\dot{x}(t)$, $\dot{z}(t)$, $\dot{\theta}(t)$ e $\dot{l}(t)$ é a velocidade para cada grau de liberdade e z , θ e l são os deslocamentos.

Como foi dito no início do capítulo o modelo no domínio do tempo não é avaliado neste trabalho, no entanto foi descrito para permitir obter as equações do modelo de frequência para ondas regulares. As equações em função do tempo foram convertidos para o domínio da frequência, através de uma transformada com amplitudes complexas.

3.5 Modelo no Domínio da Frequência

Se o sistema de conversão de energia (PTO), numa primeira abordagem, for considerado que têm um comportamento linear, então numa forma geral o desempenho do dispositivo pode ser estudado para ondas regulares, no domínio da frequência. Esta abordagem provou ser particularmente útil na afinação do dispositivo para frequências específicas do espectro. Neste estudo um modelo no domínio da frequência é desenvolvido e utilizado para descrever o comportamento para ondas regulares do dispositivo em estudo.

Aplicando a equação 3.1, as equações que descrevem as forças horizontais x , forças verticais z , os torques em torno do eixo yy que actuam no dispositivo em estudo e as forças que actuam na massa 1 segundo l são, respectivamente:

$$\begin{aligned} & - (M_b + M_{m_1} + M_{m_2})(\omega^2 \hat{X}) - (I_{x\theta b} + I_{x\theta m_1} + I_{x\theta m_2})(\omega^2 \hat{\theta}) + M_{m_1}(\omega^2 \hat{l} \cos \alpha) = F_{D_x} + \\ & + (\omega^2 A_{xx} - i\omega B_{xx})\hat{X} + (\omega^2 A_{xz} - i\omega B_{xz})\hat{Z} + (\omega^2 A_{x\theta} - i\omega B_{x\theta})\hat{\theta} , \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} & - (M_b + M_{m_1} + M_{m_2})(\omega^2 \hat{Z}) - (I_{z\theta b} + I_{z\theta m_1} + I_{z\theta m_2})(\omega^2 \hat{\theta}) - M_{m_1}(\omega^2 \hat{l} \sin \alpha) = F_{D_z} + \\ & + (\omega^2 A_{zz} - i\omega B_{zz})\hat{Z} + (\omega^2 A_{zx} - i\omega B_{zx})\hat{X} + (\omega^2 A_{z\theta} - i\omega B_{z\theta})\hat{\theta} - C_{zz}\hat{Z} - C_{z\theta}\hat{\theta} , \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} & - (I_{\theta\theta b} + I_{\theta\theta m_1} + I_{\theta\theta m_2})(\omega^2 \hat{\theta}) - (I_{\theta z b} + I_{\theta z m_1} + I_{\theta z m_2})(\omega^2 \hat{Z}) - (I_{\theta x b} + I_{\theta x m_1} + I_{\theta x m_2})(\omega^2 \hat{X}) \\ & = F_{D_\theta} + (\omega^2 A_{\theta\theta} - i\omega B_{\theta\theta})\hat{\theta} + (\omega^2 A_{\theta z} - i\omega B_{\theta z})\hat{Z} + (\omega^2 A_{\theta x} - i\omega B_{\theta x})\hat{X} - C_{\theta\theta}\hat{\theta} - C_{\theta z}\hat{Z} , \end{aligned} \quad (3.13)$$

e

$$- M_{m_1}\omega^2 \hat{Z} \sin \alpha - M_{m_1}\omega^2 \hat{X} \cos \alpha - M_{m_1}\omega^2 \hat{l} = -K_L \hat{l} - D_L(i\omega \hat{l}) , \quad (3.14)$$

onde M_b , M_{m_1} e M_{m_2} são, respectivamente, as massas da bóia, da massa 1 e da massa 2, ω é a frequência angular em rad/s, \hat{X} , $\hat{\theta}$, \hat{Z} são as amplitudes complexas do deslocamento do dispositivo e \hat{l} é a amplitude complexa do deslocamento da massa 1, C_{ij} é o coeficiente de restituição hidrodinâmico para o grau de liberdade ij , A_{ij} e B_{ij} são os coeficientes hidrodinâmicos de massa adicional e de amortecimento, F_{D_i} é a amplitude

complexa da força ou momento de difracção para o grau de liberdade i (calculada segundo a equação 3.3), I_{ij_b} , $I_{ij_{m_1}}$ e $I_{ij_{m_2}}$ são os momentos de inércia da bóia, da massa 1 e da massa 2, respectivamente, para o grau de liberdade ij (ver capítulo 3.7). K_L e D_L são os coeficientes de mola e de amortecimento, e α é a inclinação em graus do eixo da massa l em relação ao sistema de coordenadas do dispositivo, neste caso é 30° para a posição em equilíbrio do dispositivo (ver fig. 3.3).

Admitiu-se, neste caso, que a massa total, M_T , do sistema é o somatório dos 3 componentes que constituem o dispositivo: a bóia e as massas 1 e 2. Notar que a unidade das massas é toneladas. As massas da bóia, M_b , da massa 1, M_{m_1} e da massa 2, M_{m_2} , são dadas, respectivamente, por:

$$M_b = per M_T , \quad (3.15)$$

$$M_{m_1} = k M_T , \quad (3.16)$$

$$M_{m_2} = M_T - (M_b + M_{m_1}) , \quad (3.17)$$

onde per é a uma fracção da massa total do dispositivo que corresponde a massa da bóia e M_T é a massa total do dispositivo (ver capítulo 3.8 para ver como se calcula). E k representa a fracção da massa total a que corresponde o valor da massa 1, que se assumiu ser uma variável de controlo do problema de optimização do sistema (ver capítulo 4 para mais detalhes).

Aquando a construção de dispositivos deste género por vezes é complicado ser-se fiel aos valores dos pesos destes utilizados durante a sua optimização numérica, e por esse motivo optou-se por fazer-se um estudo para diferentes massas da bóia, assim neste caso, per pode tomar os valores 10%, 15%, 20%, 25% e 30% (são valores de *input* dados ao modelo).

Uma vez que se assumiu que o dispositivo tem um comportamento linear, os parâmetros hidrodinâmicos A_{ij} , B_{ij} , \hat{F}_{D_i} e C_{ij} , que são dependentes da geometria da bóia e da frequência ω , podem ser calculados por *software* como por exemplo o WAMIT (ver secção 3.8).

Segundo a teoria linear, e uma vez que se está a trabalhar com um sistema linear, se as ondas tiverem uma forma regular (sinusoides) de frequência ω , a força de difracção ou excitação apresenta também uma variação sinusoidal com o tempo, de frequência igual à frequência das ondas incidentes.

Tal como consta em [Falnes, 2002] para a frequência angular ω , a potência útil média extraída, em Watts, pelo equipamento mecânico pode ser dada por:

$$\bar{P}_u = \frac{1}{2} D_L \omega^2 |\hat{l}|^2. \quad (3.18)$$

Deste modo, variando os valores de K_L e D_L é possível calcular, para cada frequência angular e amplitude de onda, a amplitude do movimento da massa 1, $|\hat{l}|$, e a potência útil média.

A potência incidente para ondas regulares de frequência angular ω e amplitudes de onda A , em W/m, é dada por:

$$P_i = \frac{\rho g^2 A^2 (1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}) \tanh(kh)}{4\omega}, \quad (3.19)$$

onde a profundidade da água, em metros, é h , k é o número de onda dado pela raiz positiva da relação de dispersão: $\frac{\omega^2}{g} = k \tanh(kh)$ (mais detalhes no anexo A), ρ é densidade da água (1025 kg/m³) e g a aceleração da gravidade.

A largura de captura de um dispositivo, em metros, é dada pelo quociente da potência útil média \bar{P}_u (eq. 3.18) e a potência incidente P_i (eq. 3.19):

$$\lambda_c = \frac{\bar{P}_u}{P_i} = \frac{2D_L \omega^3 |\hat{l}|^2}{\rho g^2 A^2 (1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}) \tanh(kh)}. \quad (3.20)$$

3.6 Modelo Estocástico

De modo, a avaliar o comportamento do dispositivo no domínio da frequência para ondas irregulares, um modelo estocástico é desenvolvido. Estes modelos foram previamente desenvolvidos para centrais de coluna de água oscilante (CAO) [de O. Falcão and Rodrigues, 2002].

Funções densidade de probabilidade são definidas para os parâmetros relevantes que caracterizam o comportamento do sistema. Assumindo que o comportamento do sistema é linear e que a elevação das ondas para ondas irregulares pode ser considerada como um processo estocástico com uma função densidade de probabilidade Gaussiana, as variáveis que definem o comportamento do sistema, como, por exemplo, deslocamento da massa, também têm uma função densidade de probabilidade Gaussiana. Para estas variáveis e para diferentes condições do mar as funções densidade de probabilidade (ou, neste caso, variâncias) são obtidas e o dispositivo é caracterizado em termos destas funções. [Cândido and Justino, 2008]

Similarmente ao que foi feito em [de O. Falcão and Rodrigues, 2002] e [Cândido and Justino, 2008], considerou-se um intervalo de tempo T e assumiu-se que a elevação da superfície livre do mar é uma variável aleatória Gaussiana dada por:

$$\eta(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \hat{A}_n \exp(in\omega_0 t) , \quad (3.21)$$

onde $\omega_0 = 2\pi/T$, $\hat{A}_n = |\hat{A}_n| \exp(i\varphi_n)$ é uma variável complexa aleatória, sendo φ_n uma variável aleatória uniformemente distribuída no intervalo $[0; 2\pi[$ e assumindo que $E\{|\hat{A}_n|^2\} = \sigma_n^2$ e $E\{\hat{A}_n \hat{A}_{n'}^*\} = 0$, para $n \neq n'$.

Assumindo que o estado do mar pode ser representado por um espectro de potência discreto, a variância da elevação da superfície do mar é definida por [de O. Falcão and Rodrigues, 2002]:

$$\sigma_\eta^2 = E\{\eta\eta^*\} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{n'=-\infty}^{+\infty} \exp(i(n-n')\omega_0 t) E\{\hat{A}_n \hat{A}_{n'}^*\} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sigma_n^2 . \quad (3.22)$$

Se o espectro de potência for contínuo a variância da elevação da superfície do mar é dada por:

$$\sigma_\eta^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\eta(\omega) d\omega , \quad (3.23)$$

onde $S_\eta(\omega)$ é uma densidade espectral definida no intervalo $]-\infty, +\infty[$, isto é, um espectro representativo de um estado do mar real (ver anexo A.3 para mais detalhes). Assim, no caso limite, quando $T \rightarrow \infty$ obtêm-se $\omega_0 \rightarrow d\omega$ e $E\{|\hat{A}_n|^2\} = \sigma_n^2 \rightarrow S_\eta(\omega) d\omega$.

Tendo em consideração as equações 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14, que descrevem o comportamento do dispositivo no domínio da frequência, é possível encontrar as funções de transferência, $HG_1(n\omega_0)$, $HG_2(n\omega_0)$, $HG_3(n\omega_0)$ e $HG_4(n\omega_0)$, que relacionam a amplitude da onda incidente \hat{A}_n com a amplitude do deslocamento para cada grau de liberdade do dispositivo (x , θ , z e l), de modo que:

$$\hat{X}(n\omega_0) = HG_1(n\omega_0) \hat{A}_n , \quad (3.24)$$

$$\hat{\theta}(n\omega_0) = HG_2(n\omega_0) \hat{A}_n , \quad (3.25)$$

$$\hat{Z}(n\omega_0) = HG_3(n\omega_0)\hat{A}_n , \quad (3.26)$$

$$\hat{l}(n\omega_0) = HG_4(n\omega_0)\hat{A}_n . \quad (3.27)$$

As funções de transferência, $HG_i(n\omega_0)$, consistem na resolução das 4 equações no domínio da frequência em função dos deslocamentos \hat{X} , $\hat{\theta}$, \hat{Z} e \hat{l} . Obtendo-se 4 funções de transferência, uma para cada deslocamento.

Assim, tendo em conta a equação 3.21, os deslocamentos para os graus de liberdade do dispositivo são descritos por:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} HG_1(n\omega_0)\hat{A}_n \exp(in\omega_0 t) , \quad (3.28)$$

$$\theta(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} HG_2(n\omega_0)\hat{A}_n \exp(in\omega_0 t) , \quad (3.29)$$

$$z(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} HG_3(n\omega_0)\hat{A}_n \exp(in\omega_0 t) , \quad (3.30)$$

$$l(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} HG_4(n\omega_0)\hat{A}_n \exp(in\omega_0 t) . \quad (3.31)$$

Notar que, do mesmo modo que η : x , θ , z e l são variáveis aleatórias Gaussianas, com variâncias (para o caso em que o estado do mar é representado por um espectro de potência contínuo, que é o que interessa neste estudo):

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\eta(\omega) |HG_1(\omega)|^2 d\omega , \quad (3.32)$$

$$\sigma_\theta^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\eta(\omega) |HG_2(\omega)|^2 d\omega , \quad (3.33)$$

$$\sigma_z^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\eta(\omega) |HG_3(\omega)|^2 d\omega , \quad (3.34)$$

$$\sigma_l^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\eta(\omega) |HG_4(\omega)|^2 d\omega . \quad (3.35)$$

As variâncias das velocidades são:

$$\dot{\sigma}_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\eta(\omega) \omega^2 |HG_1(\omega)|^2 d\omega , \quad (3.36)$$

$$\dot{\sigma}_\theta^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\eta(\omega) \omega^2 |HG_2(\omega)|^2 d\omega , \quad (3.37)$$

$$\dot{\sigma}_z^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\eta(\omega) \omega^2 |HG_3(\omega)|^2 d\omega , \quad (3.38)$$

$$\dot{\sigma}_l^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\eta(\omega) \omega^2 |HG_4(\omega)|^2 d\omega , \quad (3.39)$$

Assumindo que a força exercida pelo PTO (em notação inglesa: *load force*), F_L , na massa 1, pode ser dada por:

$$F_L(t) = \pm \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (K_L + in\omega_0 D_L) (\hat{l}(n\omega_0)) \exp(in\omega_0 t) , \quad (3.40)$$

obtem-se para a variância da *load force* (para um espectro de potência contínuo):

$$\sigma_{F_L}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\eta(\omega) |Z_L(\omega)|^2 |HG_4(\omega)|^2 d\omega , \quad (3.41)$$

onde $Z_L(\omega) = K_L + i\omega D_L$.

A potência média útil, em Watts, pode ser escrita como:

$$\bar{P}_u = D_L E\{|\dot{l}(t)|^2\} , \quad (3.42)$$

onde l é a velocidade da massa 1 e, no caso de um estado do mar representado por um espectro de potência contínuo, tem-se:

$$\bar{P}_u = D_L \int_{-\infty}^{+\infty} S_\eta(\omega) \omega^2 |HG_4(\omega)|^2 d\omega . \quad (3.43)$$

A potência incidente, em kW/m, para ondas irregulares segundo [Holthuijsen, 2007] pode ser dada por:

$$P_i = \rho g \int_0^{+\infty} c_g(\omega) S_\eta(\omega) d\omega , \quad (3.44)$$

onde c_g é a velocidade de grupo, isto é, a velocidade com que se propaga a energia das ondas e é dada por:

$$c_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] c , \quad (3.45)$$

onde k é o número de onda, h a profundidade da água e c a velocidade de fase dada por:

$$c = \frac{\omega}{k} . \quad (3.46)$$

A largura de captura λ_c (em metros) do dispositivo é dada pelo quociente da potência média útil \bar{P}_u (eq. 3.43) e a potência incidente P_i (eq. 3.44).

3.7 Momentos de Inércia e Centro de Gravidade

Nas equações que governam o dispositivo em estudo, em qualquer dos domínios, é necessário calcular os momentos de inércia para os diferentes graus de liberdade.

O momento de inércia é a inércia (resistência) ao movimento de rotação de um corpo sólido. Por definição, o momento de inércia I de um corpo de massa m e que gira em torno de um eixo, a uma distância r dele, é:

$$I = mr^2 . \quad (3.47)$$

Se o corpo é constituído de n elementos, o seu momento de inércia total é igual à

soma dos momentos de inércia de cada elemento:

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2, \quad (3.48)$$

sendo m_i a massa de cada elemento, e r_i a sua distância ao eixo de rotação.

No caso em estudo, optou-se por dividir o sistema em 3 elementos. O elemento 1 é a massa 1, o elemento 2 é a bóia e o elemento 3 é a massa 2.

Os momentos de inércia de interesse para este estudo são $I_{z\theta} = I_{\theta z}$, $I_{x\theta} = I_{\theta x}$ e $I_{\theta\theta}$. Os momentos de inércia $I_{z\theta} = I_{\theta z}$ e $I_{x\theta} = I_{\theta x}$ são dados pelo WAMIT, ver capítulo 3.8, enquanto que o momento de inércia $I_{\theta\theta}$ tem que ser calculado segundo a definição (eq. 3.48).

Para o momento $I_{\theta\theta}$ é necessário somar o momento de inércia de cada elemento do dispositivo (massa 1, massa 2 e bóia). Admitindo que as massas se encontram concentradas nos respectivos centros de gravidade, obtém-se:

$$I_{\theta\theta} = I_{\theta\theta b} + I_{\theta\theta m_1} + I_{\theta\theta m_2} = m_b(x_{gb}^2 + z_{gb}^2) + m_{m1}(x_{gm1}^2 + z_{gm1}^2) + m_{m2}(x_{gm2}^2 + z_{gm2}^2), \quad (3.49)$$

onde x_{gb} , z_{gb} , x_{gm1} , z_{gm1} , x_{gm2} e z_{gm2} são as coordenadas (x, z) do centro de gravidade da bóia, da massa 1 e da massa 2, respectivamente.

Segundo o princípio de Arquimedes, qualquer corpo mergulhado num fluido sofre da parte deste uma impulsão vertical de baixo para cima cuja intensidade é igual ao peso do volume de fluido deslocado [Oliveira and Lopes, 2010]. Para o presente estudo a análise de estabilidade para o dispositivo foi realizada com base na posição do centro de flutuação (CF) e do centro de gravidade (CG).

O centro de flutuação (CF) é o centro de gravidade do volume submerso de um corpo. Este valor é calculado pelo WAMIT e é dado em coordenadas $(x, y, z) = (8.6414, 0, -14.2501)$.

O centro de gravidade (CG) de um corpo é um ponto localizado no próprio corpo, ou fora dele, pelo qual passa a resultante das forças de gravidade que actuam em cada elemento da sua massa. É como se toda a massa do corpo se concentrasse naquele ponto. O CG pode também ser entendido como um ponto em relação ao qual é nulo o somatório dos momentos dos pesos das partículas que constituem o corpo (ou sistema). A localização do ponto do CG, neste caso, dar-se-á através das coordenadas X_g e Z_g (note-se que devido a questões de simetria $Y_g = 0$, ver eixo da figura 3.3) que serão obtidas através da relação entre o respectivo momento estático da massa em relação

aos eixos x e z , e a massa total desta. Por definição:

$$X_g = \frac{\int_V x \rho dV}{\int_V \rho dV} \quad e \quad Z_g = \frac{\int_V z \rho dV}{\int_V \rho dV}, \quad (3.50)$$

onde ρ é a massa específica do corpo que poderá variar de ponto para ponto.

A geometria do corpo em estudo não é simples. Assim, neste caso, o modo mais simples de calcular o centro de gravidade do sistema consiste em dividir o sistema em elementos cujas geometrias sejam mais simples. Para estes casos, o CG total do sistema é dado pela soma da multiplicação da massa de cada elemento por as respectivas coordenadas do CG (x, z) a dividir pela soma das massas de todos os elementos, isto é:

$$X_g = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad e \quad Z_g = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i}. \quad (3.51)$$

Admitiu-se que o centro de gravidade (CG) da bóia (elemento 2) é igual ao centro de flutuação (CF) do sistema. Assim, segundo a equação 3.51, a coordenada x do centro de gravidade total do sistema, X_g , é:

$$X_g = \frac{M_b x_{g_b} + M_{m1} x_{g_{m1}} + M_{m2} x_{g_{m2}}}{M_T}, \quad (3.52)$$

onde x_b representa a coordenada x do CG da bóia, admitiu-se que a massa da bóia está concentrada na coordenada do centro de flutuação, logo a coordenada x do CG da bóia é igual à coordenada x do CF do dispositivo, $x_b = X_{CF}$. E $x_{g_{m1}}$ e $x_{g_{m2}}$ são os valores da coordenada x do CG da massa 1 e 2, respectivamente.

Admitindo que $X_g = X_{CF}$ e substituindo, as massas pelas respectivas equações 3.15, 3.16 e 3.17, obtemos:

$$\begin{aligned} X_g &= \frac{per M_T X_{CF} + k M_T x_{g_{m1}} + M_T (1 - per - k) x_{g_{m2}}}{M_T} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow X_{CF} = per X_{CF} + k x_{g_{m1}} + (1 - per - k) x_{g_{m2}}, \end{aligned} \quad (3.53)$$

onde k e $x_{g_{m1}}$ assumiram-se variáveis de controlo do problema de optimização do sistema. Logo, consegue-se obter a coordenada x do CG da massa 2 em ordem às

variáveis do problema de optimização:

$$x_{g_{m2}} = \frac{(1 - per)X_{CF} + kx_{g_{m1}}}{1 - per - k} . \quad (3.54)$$

A coordenada z do centro de gravidade total do sistema, Z_g , segundo a equação 3.51, é:

$$\begin{aligned} Z_g &= \frac{perM_T z_b + kM_T z_{g_{m1}} + M_T(1 - per - k)z_{g_{m2}}}{M_T} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow Z_g &= perZ_{CF} + kz_{g_{m1}} + (1 - per - k)z_{g_{m2}} , \end{aligned} \quad (3.55)$$

onde z_b representa a coordenada z do CG da bóia, que se admitiu que é igual à coordenada z do CF, $z_b = Z_{CF}$. E $z_{g_{m1}}$ e $z_{g_{m2}}$ são os valores da coordenada z do CG das massas 1 e 2, respectivamente.

Admitiu-se que as coordenadas $z_{g_{m1}}$ e $z_{g_{m2}}$ se encontram nos segmentos de recta onde se encontram as massas. Assim, tendo em conta a geometria do dispositivo têm-se que:

$$z_{g_{m1}} = -0.5775x_{g_{m1}} , \quad (3.56)$$

$$z_{g_{m2}} = -0.5775x_{g_{m2}} - 24.99 = -0.5775 \left(\frac{(1 - per)X_{CF} + kx_{g_{m1}}}{1 - per - k} \right) - 24.99 . \quad (3.57)$$

Substituindo as equações 3.56 e 3.57 na equação que calcula o Z_g , equação 3.55, obtêm-se:

$$Z_g = per.Z_{CF} + k(-0.5775x_{g_{m1}}) + (1 - per - k) \left[-0.5775 \left(\frac{(1 - per)X_{CF} + kx_{g_{m1}}}{1 - per - k} \right) - 24.99 \right] . \quad (3.58)$$

Uma vez calculados os centros de gravidade para os 3 elementos que constituem o dispositivo, é possível calcular os momentos de inércia necessários. Substituindo os CGs nas equações dos momentos de inércia (eq. 3.65, 3.66 e 3.49), têm-se todas as equações em ordem a algumas das variáveis de controlo do problema de optimização, k e $x_{g_{m1}}$.

3.8 WAMIT

O WAMIT é um programa computacional de radiação e difracção desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Oceânica do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) para análise linear da interacção de ondas de superfície com estruturas, sendo que a profundidade da água pode ser finita ou infinita. Permite analisar um ou vários corpos. Os corpos podem estar localizados na superfície livre, submersos ou no fundo do mar. Uma variedade de opções permite a análise dinâmica dos corpos que podem ser flutuadores livres, restringidos, ou fixos numa posição. De seguida é descrito, numa forma breve, o programa WAMIT com base na literatura [WAMIT, 2002].

O WAMIT é um dos programas mais utilizados pela indústria *offshore* e de construção de dispositivos de aproveitamento de energia das ondas, devido ao alto desempenho dos algoritmos que utiliza para o cálculo da equação integral de *Green*. É através da solução deste integral que o WAMIT determina os potenciais de velocidade de radiação e difracção na superfície molhada do corpo [WAMIT, 2002]. Este é capaz de calcular diversos parâmetros fundamentais para a análise da dinâmica de um corpo, como os coeficientes hidrostáticos de massa adicional e amortecimento, as forças de excitação ou difracção, pressões e elevação da superfície livre.

Devido à fiabilidade que o WAMIT apresenta ao resolver o problema de difracção e radiação para uma dada geometria e para frequências fornecidas, este foi utilizado no trabalho em estudo para o cálculo dos parâmetros hidrostáticos e hidrodinâmicos de primeira ordem. A versão do WAMIT utilizada neste trabalho foi a versão 6.

O WAMIT consiste em dois subprogramas, o “POTEN” e o “FORCE”, que normalmente são executados sequencialmente. O “POTEN” resolve os potenciais de velocidade da radiação e difracção na superfície do corpo. Enquanto, o “FORCE” calcula os coeficientes hidrodinâmicos, os movimentos do corpo e as forças que nele actuam (sempre com as condições de fronteira e soluções linearizadas). Também as velocidades e as pressões sobre a superfície do corpo são calculadas. O “FORCE” pode avaliar dados adicionais, incluindo as velocidades e as pressões em posições especificadas no domínio do fluido e elevações de onda sobre a superfície livre. Na literatura [WAMIT, 2002] encontram-se mais informações de como o programa funciona. Os dados para execução dos subprogramas, “POTEN” e “FORCE”, são descritos nos ficheiros de controlo potencial (em notação inglesa: *Potencial Control Files*) e de controlo das forças (em notação inglesa: *Force Control Files*), com as extensões “.pot” e “.frc”, respectivamente.

O WAMIT necessita de quatro ficheiros de entrada: o “.pot”, o “.frc”, o “.wam” e o “.gdf”. Relativamente aos dois primeiros ficheiros já foi especificado anteriormente os objectivos destes, faltando descrever os dois últimos. O “.wam” serve para definir o que o utilizador pretender calcular e como. Enquanto o “.gdf” é o ficheiro que contém as coordenadas dos painéis que descrevem a superfície do corpo em estudo (apenas a

superfície submersa). As opções utilizadas neste trabalho para cada um destes ficheiros encontram-se no anexo B.

O WAMIT analisa as geometrias através de discretização da superfície das bóias. A descrição da superfície do corpo flutuante pode ser descrita de duas alternativas possíveis. A primeira alternativa é usar o *low-order method* e a segunda é utilizar o *higher-order method*.

No *low-order method*, a superfície do corpo é representada por um conjunto de painéis planos quadriláteros. E as soluções para o potencial de velocidade são aproximadamente constantes em cada painel. Os painéis são descritos pelas coordenadas de cada vértice. Esta lista de coordenadas por ser gerada de várias maneiras, mas provavelmente a via mais fácil é utilizando a ferramenta 3D CAD MultiSurf, que foi a utilizada neste trabalho.

O MultiSurf é um programa de modelagem geométrica, que fornece as ferramentas necessárias para criar as superfícies do corpo. Onde a malha gerada pode ser exportada para um ficheiro, que pode ser convertido no ficheiro “.gdf” requerido.

No caso do *higher-order method*, a geometria do corpo pode ser representada por meio de técnicas diferentes, incluindo painéis plano, B-splines, modelos de geometria desenvolvidos em MultiSurf e expressões analíticas. O potencial de velocidade sobre o corpo é representado por B-splines de uma maneira contínua e a velocidade do fluido sobre o corpo pode ser calculadas por diferenciação analítica.

No presente trabalho utilizou-se o *low-order method* como opção para análise da geometria no WAMIT e o programa MultiSurf para gerar a malha que discretiza a superfície do corpo e para obter o ficheiro com as coordenadas de todos os painéis.

Inicialmente analisou-se no WAMIT outra malha com as mesmas características mas com mais painéis (576 painéis), mas para uma dada frequência o número de iterações para o cálculo das forças de difracção era elevado, indicador de erros associados à solução apresentada pelo programa, o que poderia levar a erros nos modelos matemáticos. Assim, optou-se por reduzir o número de painéis (para 408) o que permitiu que os valores convergissem com um menor número de iterações.

É importante referir, que a habilidade de um conversor de energia das ondas extrair energia das ondas do mar depende da geometria deste, que neste caso, implica o movimento da massa que em conjunto com o mecanismo de PTO permite a produção de energia.

De todos os parâmetros possíveis de calcular no WAMIT, os parâmetros relevantes a calcular para a malha do corpo em estudo são, os coeficientes de massa adicional (A_{ij}) e amortecimento (B_{ij}), as forças de difracção ou excitação (\hat{F}_{D_i}), os momentos (I_{ij}) e os coeficientes de restituição (C_{ij}). São parâmetros hidrostáticos que dependem da geometria da bóia e da frequência ω . Alguns destes parâmetros são devolvidos pelo WAMIT na forma adimensional e é necessário a obtenção dos seus valores di-

mensionais, mais detalhes no capítulo 4 do manual do [WAMIT, 2002]. Os parâmetros adimensionais dos coeficientes de massa adicional e amortecimento são indicados com uma barra e são definidos por:

$$\bar{A}_{ij} = \frac{A_{ij}}{\rho L^k}, \quad (3.59)$$

$$\bar{B}_{ij} = \frac{B_{ij}}{\rho L^k \omega}, \quad (3.60)$$

onde L^k é parâmetro de escala, que no caso em estudo é 1.

Relativamente aos coeficientes de restituição, os parâmetros adimensionais são indicados com uma barra e são definidos por:

$$\bar{C}_{33} = \frac{\bar{C}_{33}}{\rho g L^2}, \quad (3.61)$$

$$\bar{C}_{35} = \frac{\bar{C}_{35}}{\rho g L^3}. \quad (3.62)$$

Uma vez que para o ficheiro de entrada “.frc” foi utilizada a alternativa na forma 1 (ver anexo B), têm-se que $C_{ij} = C_{ji}$, e que o coeficiente de restituição C_{55} é dada por:

$$\bar{C}_{55} = \frac{\bar{C}_{55}}{\rho g L^4} - m_T g Z_g, \quad (3.63)$$

onde m_T é a massa total do dispositivo e Z_g é a coordenada z do centro de gravidade do dispositivo total, dada pela equação 3.58.

A matriz dos momentos de inércia dada pelo WAMIT é definida como:

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ mz_g & 0 & -mx_g & I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ -my_g & mx_g & 0 & I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

Os momentos de inércia de interesse para o presente estudo, $I_{z\theta} = I_{\theta z}$ e $I_{x\theta} = I_{\theta x}$, são dados por (ver capítulo 3.7 para mais detalhes):

$$I_{z\theta} = I_{\theta z} = I_{z\theta b} + I_{z\theta m_1} + I_{z\theta m_2} = -m_b \cdot x_{g_b} - m_{m1} \cdot x_{g_{m1}} - m_{m2} \cdot x_{g_{m2}} , \quad (3.65)$$

$$I_{x\theta} = I_{\theta x} = I_{x\theta b} + I_{x\theta m_1} + I_{x\theta m_2} = m_b \cdot z_{g_b} + m_{m1} \cdot z_{g_{m1}} + m_{m2} \cdot z_{g_{m2}} , \quad (3.66)$$

onde x_{g_b} , z_{g_b} , $x_{g_{m1}}$, $z_{g_{m1}}$, $x_{g_{m2}}$ e $z_{g_{m2}}$ são as coordenadas do centro de gravidade (x, z) (equações no capítulo 3.7) da bóia, massa 1 e massa 2, respectivamente.

Foi desenvolvido um programa em *Matlab* para extrair os parâmetros relevantes dos ficheiros de saída do WAMIT e para facilitar o processo de dimensionamento destes, para serem usados nos programas *Matlab* desenvolvidos que avaliam a dinâmica do dispositivo no domínio da frequência para ondas regulares e irregulares (modelo estocástico).

O WAMIT calcula o volume imerso do corpo que é definido através da malha gerada. A massa total, M_T , do dispositivo é calculada como base no princípio de Arquimedes. Este princípio diz que um corpo imerso num fluído sofre da parte deste uma impulsão vertical igual ao peso do volume de fluido deslocado, este volume de fluido deslocado é igual ao volume da parte imersa do sólido [Oliveira and Lopes, 2010]:

$$m_{dispositivo} = V_{dispositivo} \rho , \quad (3.67)$$

onde $V_{dispositivo}$ é o volume do corpo submerso, 5449.22 m^3 (valor dado pelo WAMIT) e ρ a densidade da água, 1025 kg/m^3 .

Conclui-se que o trabalho de modelar um conversor de energia das ondas pode ser definido por três etapas, figura 3.5:

- A geometria do sistema é definida e a malha é gerada no MultiSurf;
- Os coeficientes hidrodinâmicos para o sistema são calculados usando o WAMIT;
- Os coeficientes hidrodinâmicos são implementados nos modelos que permitem avaliar e otimizar o comportamento do sistema em diferentes domínios. Neste trabalho, os modelos foram implementados em *Matlab*.

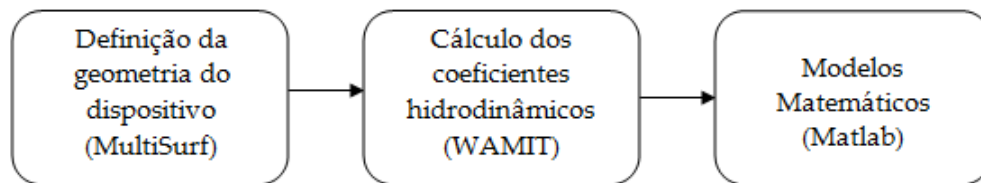


Figura 3.5: Etapas do trabalho de modelar e otimizar um conversor de energia das ondas.

4

Optimização

4.1 Introdução

Optimizar é o acto de obter o melhor resultado dentro de determinadas circunstâncias. No *design*, construção e manutenção de qualquer sistema de engenharia, é necessário tomar decisões algumas delas de natureza tecnológica em diversas etapas. Estas decisões têm como objectivo final minimizar ou maximizar o objectivo desejado.

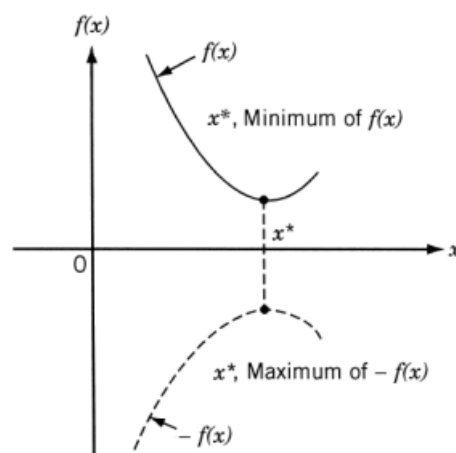


Figura 4.1: O mínimo de $f(x)$ é o mesmo que o máximo de $-f(x)$. Adaptado de [Vianello, 2012].

Tendo em conta que o objectivo desejado em qualquer situação prática pode ser expresso em função de determinadas variáveis de controlo, a optimização pode ser definida como o processo que encontra as condições que permite obter o valor máximo ou mínimo de uma função.

É possível observar na figura 4.1 que se um ponto x^* corresponde ao mínimo de

uma função $f(x)$, o mesmo ponto também corresponde ao valor máximo do negativo da função, $-f(x)$. Geralmente as funções de otimização em programas matemáticos estão pré-definidas para minimizar determinada função, uma vez que o máximo de uma função pode ser encontrado pela procura do mínimo do negativo da mesma função.

Nos últimos anos, alguns métodos de otimização conceptualmente diferentes das técnicas tradicionais de programação matemática têm sido desenvolvidos. A maioria desses métodos é baseada em certas características e comportamentos da biologia molecular. Os Algoritmos Genéticos (AGs) (em notação inglesa: *Genetic Algorithms* (GAs)) é um desses métodos, e durante a última década têm sido amplamente utilizados como ferramentas de otimização em vários domínios de problemas, incluindo as ciências, comércio e engenharia. As principais razões para o sucesso dos AGs baseia-se na sua ampla aplicabilidade, na facilidade de uso, e na sua perspectiva global (uma vez que permite encontrar a solução óptima global do problema) [Deb, 1999]. Os AGs diferem dos algoritmos tradicionais de otimização, que têm por base as derivadas, em duas formas principais:

1. Os AGs geram uma população de pontos a cada iteração e o melhor ponto da população aproxima-se da solução óptima. Nos algoritmos tradicionais é gerado um único ponto a cada iteração e a sequência desses pontos aproxima-se da solução óptima;
2. Nos AGs a selecção da população seguinte é realizada com base em computação aleatória. Enquanto, que nos algoritmos tradicionais a selecção do próximo ponto é feita tendo em conta computação determinista.

Neste trabalho, o problema em questão (descrito na secção 4.3) apresenta um espaço de busca, relativamente, complexo. Uma vez que apresenta algumas variáveis de controlo com diferentes intervalos e restrições, tornando a solução do problema uma função com muitas soluções locais. Se fosse utilizado os algoritmos tradicionais, estes acabavam por encontrar uma dessas soluções locais e parar. Assim sendo, utilizou-se os AGs por estes apresentarem-se como um bom método de busca aleatória direccionada capaz de obter a solução óptima global num espaço de busca complexo (com ou sem restrição) e por terem sido utilizados com sucesso em diversos problemas de otimização em engenharia na literatura. Neste capítulo, é descrito o princípio de operação dos AGs (largamente discutido na literatura [Teles and Gomes, 2010], [Vianello, 2012], [Roudier, 2007] e [Deb, 1999]) e apresentada a formulação e o procedimento de otimização do dispositivo em estudo.

4.2 Algoritmos Genéticos (AGs)

Os algoritmos genéticos (AGs) são um método que resolve problemas de optimização com e sem restrições baseado nos processos da genética natural e da selecção natural. É um método estocástico que pode encontrar a solução óptima global com uma alta probabilidade. O algoritmo modifica repetidamente uma população, um conjunto de soluções. A cada iteração, o AG selecciona aleatoriamente os indivíduos da população actual e utiliza-os como pais para produzir os filhos para a próxima geração. Após sucessivas gerações, a população evolui em direcção a uma solução óptima.

Neste trabalho foi utilizada a função *ga* do *Matlab*. De uma forma mais esquemática, esta função funciona, de uma forma geral, da seguinte maneira (ver figura 4.2):

1. O algoritmo inicia criando uma população inicial aleatória;
2. O algoritmo cria, então, uma sequência de novas populações. Em cada iteração, o algoritmo utiliza os indivíduos da geração actual para criar a população seguinte. Para criar a nova população, o algoritmo executa as seguintes etapas:
 - (a) Avalia a aptidão de todos os indivíduos;
 - (b) Selecciona os indivíduos mais aptos, normalmente chamados de pais, para reprodução;
 - (c) Gera novos indivíduos, os filhos, através do cruzamento dos pais;
 - (d) Uma nova população é gerada contendo os descendentes gerados pelas modificações realizadas na etapa anterior.
3. O algoritmo acaba quando um dos critérios de paragem é satisfeito.

4.2.1 Função Objectivo e Restrições

Em diversas aplicações, o problema a ser resolvido é o de maximizar ou minimizar uma função objectivo, mas existem casos onde se deseja optimizar mais que uma função objectivo, os chamados problemas multi-objectivos. Os AGs apresentam-se como um bom método de optimização de problemas multi-objectivos e de um único objectivo. No caso do presente trabalho o problema só apresenta uma função objectivo a optimizar, sendo que a descrição sobre os AGs apresentada de seguida foca-se neste tipo de problemas.

Normalmente, um problema de optimização define-se como minimizar ou maximizar uma função de n variáveis, e é escrito do seguinte modo:

$$\text{Optimizar } f(x), \text{ tal que } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ lb \leq x \leq ub, \end{cases}$$

onde $f(x)$ é a função a ser otimizada, $c(x)$ são as inequações não-lineares impostas ao problema, $ceq(x)$ são as equações não-lineares imposta ao problema e, lb e ub são os limites inferiores e superiores, respectivamente, que são permitidos para cada uma das variáveis de controlo.

As variáveis de controlo são aquelas que se alteram durante o processo de optimização a fim de optimizá-las e obter a solução global do problema.

As restrições são funções de igualdade ou desigualdade que descrevem situações indesejáveis ao problema, estas devem ser apresentadas em ordem às variáveis de controlo.

4.2.2 Operadores Genéticos

Como referido anteriormente, a população inicial, gerada de forma aleatória, é o ponto de partida para a evolução do algoritmo genético. Cada um dos indivíduos da população representa uma possível solução para o problema. Se se souber, aproximadamente, o intervalo onde se encontra a solução do problema, a função *ga* do *Matlab* permite a inicialização desse intervalo e cria a população inicial dentro desse intervalo de forma aleatória. O tamanho da população nos AGs é, normalmente, fixa e é possível alterar esse valor nas opções da função. Uma vez gerada, a população é avaliada pela função objectivo.

A ideia básica do processo de selecção no AG é permitir que os indivíduos mais adaptados tenham maiores probabilidades de reprodução. Ou seja, o processo de selecção escolhe os melhores pais para o processo de reprodução, garantindo com isto a evolução dos indivíduos (soluções). Na reprodução os melhores indivíduos de uma população passam para a próxima sem serem alterados e a restante população é criada por meio dos operadores genéticos.

O princípio básico dos operadores genéticos é transformar a população através de sucessivas gerações. Os operadores genéticos são necessários para que a população se diversifique e mantenha as características de adaptação adquiridas nas populações anteriores. Estes são os responsáveis por manter a diversidade de indivíduos em uma população - propagação de cromossomas com potenciais de gerar indivíduos aptos e possibilidade de aleatoriamente mudar as características genéticas saindo das regiões de soluções locais. Os principais operadores genéticos são o de cruzamento e o de mutação. Estes dois operadores são descritos de seguida com maior detalhe.

Cruzamento - Depois da reprodução, é implementado o operador de cruzamento. O cruzamento é o operador responsável pela propagação das características dos indivíduos mais aptos da população, por meio de troca de material genético entre os pais, permitindo que os filhos herdem essas características. Na maioria dos operadores de cruzamento, dois indivíduos (os pais) são escolhidos aleatoriamente do conjunto de indivíduos seleccionados para a reprodução. No processo mais comum de cruzamento, cruzamento simples, é seleccionado um ponto de forma aleatória nos dois pais, o ponto de cruzamento. Assim, as informações anteriores ao ponto de cruzamento de um pai são combinadas com as informações posteriores ao ponto de cruzamento do outro pai, resultando assim, um filho. Por exemplo, considerando que dois pais, cada com um comprimento de vector de 10, são dados por:

$$\text{(PARENT 1)} \quad \mathbf{X}_1 = [0 \ 1 \ 0 \mid 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1]$$

$$\text{(PARENT 2)} \quad \mathbf{X}_2 = [1 \ 0 \ 0 \mid 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]$$

o resultado do cruzamento, quando o ponto de cruzamento é 3, é:

$$\text{(OFFSPRING 1)} \quad \mathbf{X}_3 = [0 \ 1 \ 0 \mid 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]$$

$$\text{(OFFSPRING 2)} \quad \mathbf{X}_4 = [1 \ 0 \ 0 \mid 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1]$$

Uma vez que o operador de cruzamento combina as características dos pais (que têm bons valores de aptidão), espera-se que as crianças criadas tenham melhores valores e melhor aptidão para o problema.

Mutação - O operador genético de mutação é aplicado com uma pequena probabilidade de mutação após a realização do cruzamento [Vianello, 2012]. É o responsável pela introdução e manutenção da diversidade do material genético da população alterando aleatoriamente o valor de um gene de um cromossoma. A diversidade introduzida pela mutação garante a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca, além de contornar o problema das soluções locais alterando levemente o espaço de busca. A taxa de mutação indica a probabilidade dos indivíduos de sofrerem mudanças nas suas características hereditárias.

O operador de reprodução selecciona os melhores indivíduos da população (pais), o operador de cruzamento recombina esses indivíduos para criar novos indivíduos

(filhos) (a nova geração da população), e o operador de mutação altera os filhos localmente. O uso destes três operadores produz sucessivamente novas gerações com melhores aptidões.

Após a avaliação da população, é testada a convergência do processo. Se o critério de paragem não é satisfeito, a população é operada pelos operadores genéticos para criação da nova população e o resultado da nova população é avaliado. O processo é contínuo durante várias gerações até o critério de paragem ser satisfeito e o processo terminar. Como critério de paragem para os algoritmos genéticos utiliza-se, normalmente, o número máximo de gerações, o tempo limite de processamento ou o critério de estagnação, ou seja, quando não se observa melhoria da população depois de várias gerações consecutivas.

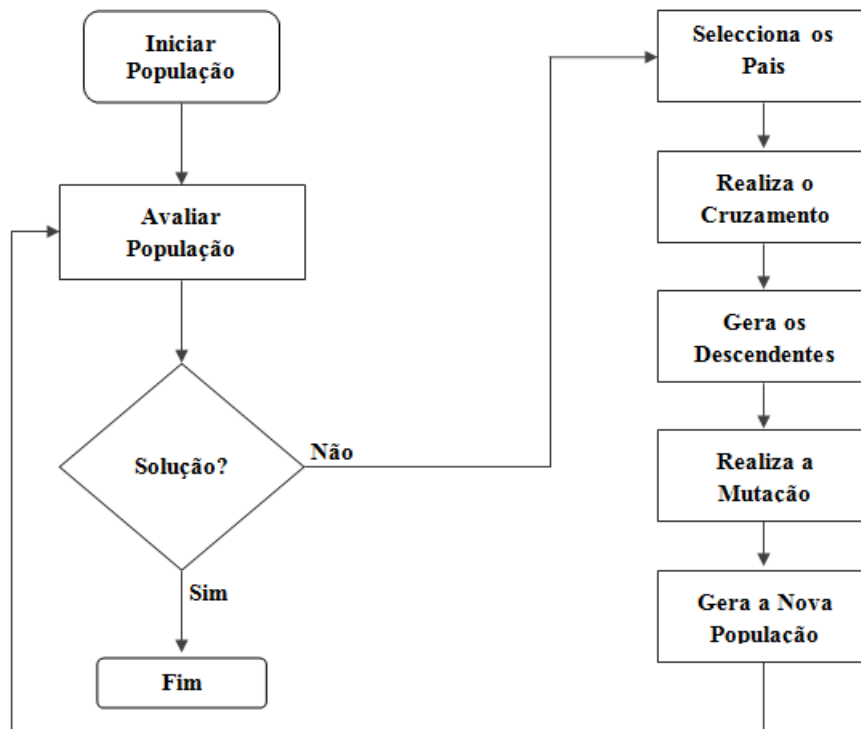


Figura 4.2: Fluxograma que descreve a função do algoritmo genético.

4.3 Procedimento de Optimização do Dispositivo

O problema de optimização em questão é de um único objectivo e consiste na maximização da potência média útil, \bar{P}_u , extraída pelo dispositivo, consequentemente a maximização da largura de captura, λ_c . A função objectivo foi ilustrada na secção 3.5

(eq. 3.20) para o modelo no domínio da frequência para ondas regulares, e na secção 3.6 para o modelo estocástico (eqs. 3.43 e 3.44), e é a seguinte, respectivamente:

$$-\frac{\bar{P}_u}{\bar{P}_i} = -\frac{2D_L\omega^3|\hat{l}|^2}{\rho g^2 A^2 (1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}) \tanh(kh)} , \quad (4.1)$$

$$-\frac{\bar{P}_u}{\bar{P}_i} = -\frac{D_L \int_{-\infty}^{+\infty} S_\eta(\omega) \omega^2 |HG_4(\omega)|^2 d\omega}{\rho g \int_0^{+\infty} c_g(\omega) S_\eta(\omega) d\omega} . \quad (4.2)$$

O sinal negativo é devido à configuração padrão da função do AG no Matlab (como uma função de minimização), enquanto que, no caso em análise é necessário a maximização da função objectivo.

De modo a reduzir o número de variáveis de controlo a serem optimizadas pelo algoritmo genérico, foi necessário proceder a algumas escolhas preliminares. Enquanto se descrevia as equações que permitem avaliar o comportamento do dispositivo foi necessário assumir que o valor da massa 1 e a coordenada x do centro de gravidade desta massa, $x_{g_{m1}}$, são variáveis de controlo do problema de optimização (ver capítulo 3.5 e 3.7). Foi adoptada esta estratégia de maneira a facilitar a avaliação do dispositivo.

Deste modo, variando os valores de K_L , D_L , k (valor que representa a percentagem a que corresponde o valor da massa 1 da massa total do dispositivo) e $x_{g_{m1}}$, seria possível maximizar, para cada frequência angular e amplitude de onda, a largura de captura do dispositivo. Ter-se-ia, assim um problema de optimização com 4 variáveis de controlo sem restrições, mas o dispositivo em estudo apresenta características distintas e muito peculiares. Uma vez que, a extracção de energia é realizada através do deslocamento de uma massa deslizante, massa 1, dentro do dispositivo, é necessário existirem algumas restrições durante o processo optimização da largura de captura. Assim, enquanto o processo de optimização tem-se que garantir que:

1. Existe equilíbrio no sistema;
2. O deslocamento da massa 1 não ultrapassa os limites do dispositivo;
3. A coordenada x do valor do centro de gravidade da massa 1, $x_{g_{m1}}$, quando o dispositivo se encontra imóvel, isto é, na sua posição de equilíbrio, encontra-se dentro do dispositivo.

Notar que a restrição do deslocamento da massa 1 só existe para o modelo no domínio da frequência para ondas regulares, uma vez que neste caso calcula-se o valor exacto dos parâmetros relevantes, enquanto que no modelo estocástico esta restrição deixa de fazer sentido, porque calcula-se a variância dos parâmetros.

4.3.1 Restrições

4.3.1.1 Equilíbrio do Sistema

Uma das restrições do problema consiste em garantir que o dispositivo quando deixa de ser solicitado pelas ondas retorna à sua posição de equilíbrio. Uma vez que o presente trabalho trata a primeira abordagem ao problema de otimizar o dispositivo em estudo, e por motivos de simplicidade do problema, assumiu-se que para existir equilíbrio a coordenada z do centro de gravidade (CG) do sistema total, Z_g , tinha que estar sempre abaixo da coordenada z do centro de flutuação (CF) do sistema total, $Z_g < Z_{CF}$. Enquanto que a coordenada x é igual, $X_g = X_{CF}$ (ver capítulo 3.7). Optou-se por assumir esta análise conservadora para garantir a estabilidade do dispositivo.

Como é possível observar no capítulo 3.7 as equações que calculam o centro de gravidade do dispositivo dependem da massa da bóia, do valor da massa 1 e das coordenadas do centro de flutuação do dispositivo. Assim, para se garantir a estabilidade é necessário saber para cada massa da bóia (10%, 15%, 20%, 25% e 30% da massa total do dispositivo - valor de *input* no modelo), qual o intervalo do valor da massa 1 que permite que $Z_g < Z_{CF}$. Por isso, realizou-se um estudo que consistiu em calcular para cada valor da massa da bóia o Z_g para diferentes valores da massa 1. Neste estudo, assumiu-se que:

1. O valor da massa 1 (que é uma percentagem da massa total do dispositivo, eq. 3.16) podia variar entre 5% e 40% de 5% em 5%;
2. As coordenadas no centro de gravidade da massa 1 são $(x_{gm1}, z_{gm1}) = (0, 0)$, o pior caso.

Substituindo o que se assumiu na equação 3.54 é possível calcular a coordenada x do centro de gravidade da massa 2, x_{gm2} , para cada percentagem de massa da bóia e da massa 1. De seguida, substituiu-se x_{gm2} na equação 3.57 e calculou-se a coordenada z do centro de gravidade da massa 2, z_{gm2} , e por último substituindo x_{gm2} e z_{gm2} na equação 3.58, calculou-se a coordenada z do centro de gravidade total do sistema, Z_g .

As coordenadas do centro de flutuação (CF) do sistema são calculadas pelo WAMIT e são $(8.641385, 0, -14.250140)$. Assim, para cada massa da bóia quer-se o intervalo para os valores da massa 1 que permita que $Z_g < -14.250140$ e $X_g = X_{CF}$.

A figura 4.3 apresenta os resultados obtidos de Z_g para cada percentagem de massa da bóia e da massa 1. Como é possível observar na figura, para o caso em que a massa da bóia é 10% da massa total, para que exista equilíbrio no sistema e este não adorne, o valor da massa 1 pode ter no máximo 20% da massa total. Nos restantes casos, o máximo que o valor da massa 1 pode assumir é 15% da massa total. É também possível observar que com o aumento da massa da bóia o centro de gravidade do sistema tende a aumentar.

A tabela 4.1 apresenta as restrições que o valor da massa 1 vai ter para cada massa da bóia, de maneira que durante a optimização se garanta o equilíbrio do sistema.

Tabela 4.1: Resultados do estudo do equilíbrio do sistema, $Z_g < Z_{CF}$: intervalos da massa 1.

Percentagem da massa da bóia	Intervalo da percentagem da massa 1
10%	entre 5% e 20%
15%	entre 5% e 15%
20%	entre 5% e 15%
25%	entre 5% e 15%
30%	entre 5% e 15%

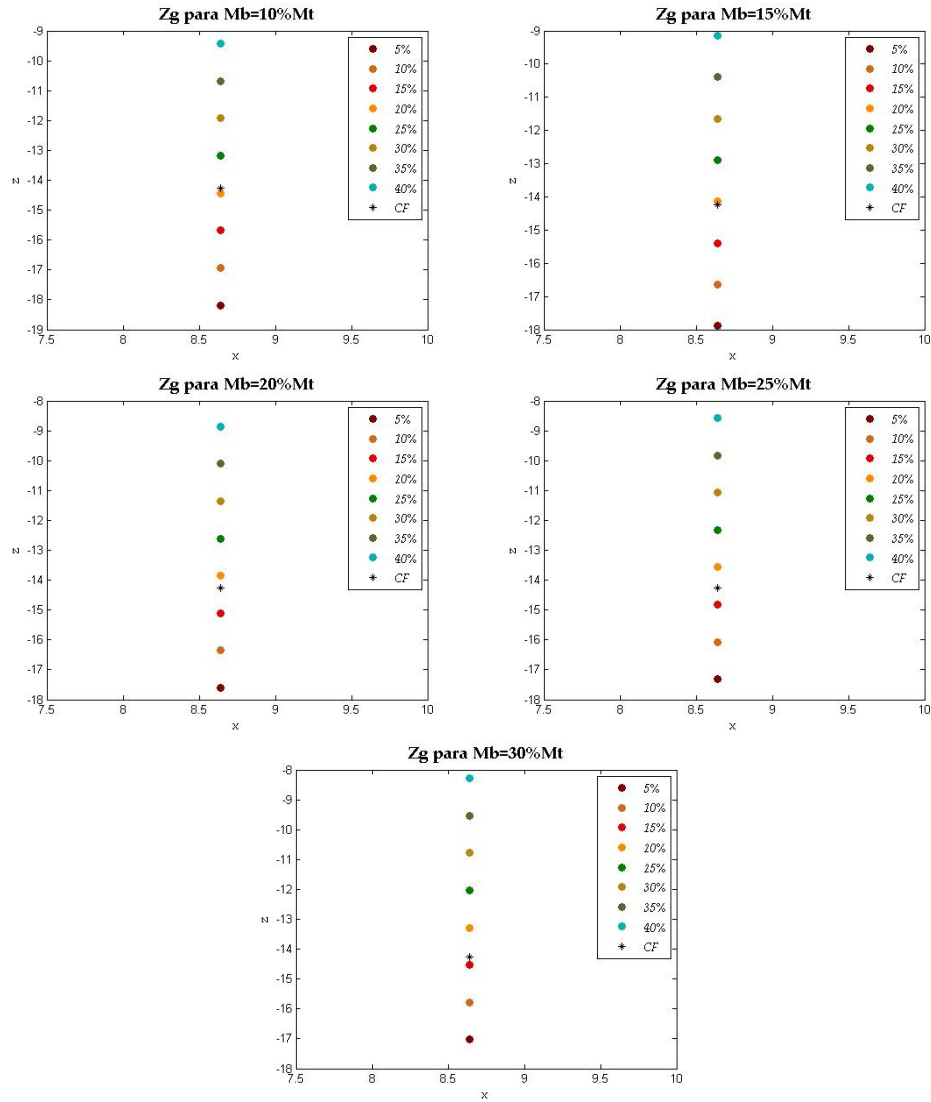


Figura 4.3: Estudo do equilíbrio do sistema para cada massa da bóia e da massa 1.

4.3.1.2 Deslocamento da Massa 1 e o seu Centro de Gravidade

No dispositivo em estudo a extracção de energia é feita com recurso a uma massa interna deslizante. É o deslocamento desta massa em relação ao movimento que a bóia apresenta devido à acção das ondas que é extraída a energia. Uma vez que esta massa se encontra dentro do dispositivo para se realizar o processo de optimização do dispositivo é necessário saber qual o máximo percurso, em metros, que a massa pode deslocar-se dentro deste.

Relativamente ao deslocamento da massa 1, assumiu-se que esta pode deslocar-se no segmento 1 (na superfície molhada do corpo, do ponto A ao B) e no no segmento 2 (na superfície do corpo fora de água, do ponto B ao C).

As coordenadas (x, z) do ponto B são $(16.8, -9.7)$, é o ponto de intersecção da recta 1 ($z = -0.5774x$) com a recta 2 ($z = 0.3358x - 15.339$). Tendo em conta que o eixo da massa deslizante faz um ângulo de 30° com a perpendicular, o comprimento do segmento 1 é 19.4 metros e do segmento 2 é 12 metros.

É necessário saber-se a dimensão da massa 1, isto é, o espaço segundo o eixo da massa que é ocupado por esta, de modo a se saber o trajecto em metros que a massa 1 pode percorrer nos segmentos. A bóia apresenta um raio de 8 metros. E para a massa 1 admitiu-se um raio de 6 metros.

O material da massa admitiu-se que podia ser chumbo ou aço, que é o que normalmente se utiliza em dispositivos deste género. Para cada tipo de material foi calculado o comprimento da massa 1, para diferentes valores da massa 1. Inicialmente, foi necessário calcular-se a secção elíptica da massa:

$$SeccaoEllipse = \pi \times a \times (b \times \cos(30^\circ)) , \quad (4.3)$$

onde $a = b = 6$ é o raio da circunferência que resulta da interacção do segmento 1 do dispositivo com um plano horizontal, que é multiplicado por $\cos(30^\circ)$ para converter para o semi-eixo menor da elipse. Obtendo-se uma secção da elipse de 97.95 m^2 . O comprimento da massa é dado por:

$$\begin{aligned} M_{massa_1} [\text{ton}] &= SeccaoEllipse [\text{m}^2] \times dm [\text{m}] \times \rho_{material} [\text{ton/m}^3] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow dm &= \frac{M_{massa_1}}{SeccaoEllipse \times \rho_{material}} , \end{aligned} \quad (4.4)$$

onde dm é o comprimento da massa 1 em metros, M_{massa_1} é o valor da massa 1 em toneladas, $SeccaoEllipse$ é a secção da elipse da massa em m^2 , 97.95 m^2 , e $\rho_{material}$ é a massa volúmica do material, em toneladas/ m^3 , utilizado para a massa. No caso do

chumbo $\rho_{chumbo} = 11\,300 \text{ ton/m}^3$ e no caso do aço $\rho_{aco} = 7850 \text{ ton/m}^3$.

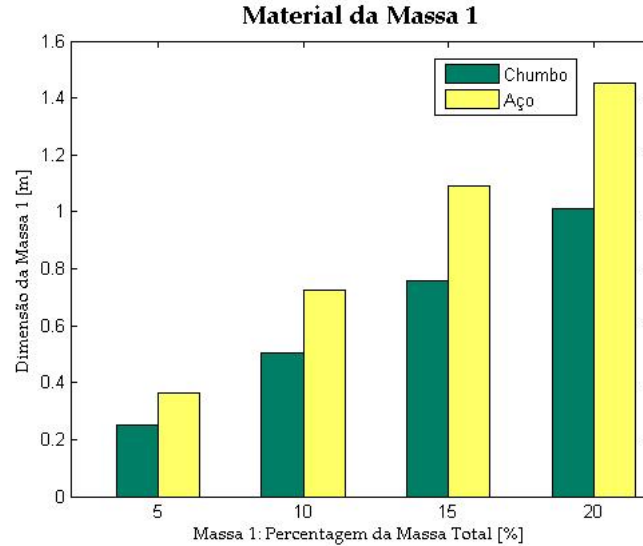


Figura 4.4: Dimensões obtidas para a massa 1 para os dois tipos de material: chumbo e aço.

Para os dois materiais (aço e chumbo) e para cada valor da massa 1, utilizou-se os valores do maior intervalo permitido segundo a restrição de equilíbrio do sistema (tabela 4.1), de 5% a 20% da massa total, calculou-se o comprimento da massa 1. A figura 4.4 apresenta os resultados obtidos, observar-se que com o aumento do valor da massa 1 a dimensão desta aumenta. E é com o aço que se obtém uma maior dimensão para a massa 1 para todos os casos. Para o objectivo deste trabalho adoptou-se o pior caso, isto é, o material que faz a massa obter maiores dimensões, que neste caso é o aço.

Então, durante o processo de optimização, para cada massa da bóia é calculada a dimensão da massa com o aço. O valor da massa 1 utilizada para este cálculo é a maior percentagem que a massa 1 pode admitir segundo as restrições que o valor da massa 1 tem para cada massa da bóia, tabela 4.1. Metade desse valor (pois admitiu-se que o centro de gravidade da massa encontra-se no centro desta) é retirado ao comprimento de cada segmento (segmento 1 e 2) de modo a massa não ultrapassar os limites do dispositivo:

$$\begin{aligned}
 p &= 19.4 - \frac{dm}{2} \\
 p_1 &= 12 - \frac{dm}{2},
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

onde p representa o comprimento em metros do segmento 1 que a massa pode percor-

rer e p_1 o comprimento do segmento 2.

O percurso máximo que a massa 1 pode realizar depende do seu centro de gravidade x_{gm1} , ponto para onde a massa tende para existir equilíbrio no sistema, em repouso. É a partir deste ponto que a massa se desloca, então é a partir deste que se calcula o percurso que a massa pode realizar.

Uma vez que o centro de gravidade da massa 1 encontra-se sempre no segmento 1, ao valor de p é necessário subtrair-se o comprimento do segmento a que corresponde a coordenada do centro de gravidade da massa (da origem até à coordenada do centro de gravidade). Neste caso, subtrai-se para garantir que a massa não excede os limites impostos (neste caso, o ponto B). Enquanto que ao valor p_1 soma-se esse o valor do comprimento do segmento a que corresponde a coordenada do centro de gravidade:

$$g(x) = \begin{cases} l_{max} = p - \frac{x_{gm1}}{\cos(30^\circ)} \\ l_{max_1} = p_1 + \frac{x_{gm1}}{\cos(30^\circ)}, \end{cases} \quad (4.6)$$

onde l_{max} é o percurso máximo, em metros, que a massa pode realizar no segmento 1 e l_{max_1} o percurso máximo que pode realizar no segmento 2. Assim, o mínimo valor de $g(x)$ é o valor máximo que a massa 1 se pode deslocar. O deslocamento da massa 1, l , tem que verificar a restrição: $l \leq \min(g(x))$.

Relativamente ao centro de gravidade de massa 1, a coordenada x do CG da massa 1, x_{gm1} , (só se tem em conta a coordenada x para este calculo, porque a coordenada z depende directamente da coordenada x , eq. 3.56) pode tomar valores entre o ponto B, de coordenada $x = 0$ e o ponto A de coordenada $x = 16.8$. Assim, ao valor máximo que x_{gm1} pode adoptar é necessário retirar metade da dimensão da massa (pois, como referido anteriormente, admitiu-se que o CG da massa está no centro dela), de modo a esta não ultrapassar o ponto A:

$$x_{gm1_{max}} = 16.8 - \left(\frac{dm}{2} \times \cos(30^\circ) \right). \quad (4.7)$$

Em todos estes cálculos não se entrou em conta com a espessura do eixo sobre o qual a massa 1 desliza.

4.3.1.3 Função a otimizar com restrições

A optimização do dispositivo em estudo, reduz-se à maximização da largura de captura:

- Equação 4.1 com 4 variáveis de controlo e 3 restrições para o caso do modelo no

domínio da frequência:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = -\frac{\bar{P}}{\bar{P}_i} = -\frac{2x_1\omega^3|l(x_1, x_2, x_3, x_4)|^2}{\rho g^2 A^2 (1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}) \tanh(kh)}, \quad (4.8)$$

- Equação 4.2 com 4 variáveis e 2 restrições para o modelo estocástico:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = -\frac{\bar{P}_u}{\bar{P}_i} = \frac{x_1 \int_{-\infty}^{+\infty} S_\eta(\omega) \omega^2 |HG_4(x_1, x_2, x_3, x_4)|^2 d\omega}{\rho g \int_0^{+\infty} c_g(\omega) S_\eta(\omega) d\omega}, \quad (4.9)$$

onde x_1 representa o coeficiente de amortecimento D_L , x_2 a coordenada x do centro de gravidade da massa 1 x_{gm1} , x_3 o valor da massa 1 em percentagem do valor da massa total, k e x_4 o coeficiente de mola K_L .

O objectivo da optimização é optimizar as equações 4.8 e 4.9 de modo que:

1. Exista garantia de equilíbrio no sistema, ver capítulo 4.3.1.1. Para tal acontecer o valor da massa 1, para cada valor da massa da bóia, encontra-se limitado por um limite inferior (lb) e superior (ub), ver tabela 4.1;
2. Que o deslocamento da massa 1, l , não ultrapasse o percurso máximo permitido: $l \leq \min(g(x))$ (eq. 4.6), ver capítulo 4.3.1.2 (só no caso do modelo no domínio da frequência). Resolvendo as 4 equações do movimento do modelo no domínio da frequência do dispositivo em estudo em ordem a l , obtêm-se a equação do deslocamento l em ordem às variáveis de controlo do problema;
3. Que a coordenada x do centro de gravidade da massa 1, x_{gm1} , se encontre dentro dos limites possíveis, ver capítulo 4.3.1.2. Para tal acontecer, x_{gm1} encontra-se limitado por um limite inferior ($lb = 0$) e superior ($ub = \text{eq. 4.7}$).

Resumindo, no modelo no domínio da frequência pretende-se obter o melhor valor de D_L , x_{gm1} , k e K_L (x_1 , x_2 , x_3 e x_4 , respectivamente) que maximiza a função da largura de captura do dispositivo, $f(x)$ (eq. 4.8), tal que:

$$\begin{cases} lb \leq x_3 \leq ub \\ 0 \leq x_2 \leq x_{gm1_{max}} (\text{eq.4.7}) \\ l(x_1, x_2, x_3, x_4) \leq \min(g(x)) (\text{eq.4.6}). \end{cases} \quad (4.10)$$

E no modelo estocástico pretende-se maximizar a função da largura de captura do dispositivo, $f(x)$ (eq. 4.9), tal que:

$$\begin{cases} lb \leq x_3 \leq ub \\ 0 \leq x_2 \leq x_{gm1_{max}}(eq.4.7). \end{cases} \quad (4.11)$$

4.3.2 Opções das Definições do AG

A função objectivo em causa, para cada modelo, eq. 4.8 e 4.9, é muito onerosa para ser avaliada, sendo necessário chegar a um compromisso entre a segurança para alcançar o ponto óptimo e limitar o número de simulações. A qualidade da função *ga* do *Matlab* para encontrar a solução óptima está relacionada com a forma como é escolhida a população inicial, o critério de paragem e com a definição dos parâmetros de controlo. Assim, os parâmetros escolhidos, para ambos os modelos, são, :

- *Population Size* (tamanho da população) = 200;
- *Generations* (gerações) = 180;
- *Elite Count* (contagem de elite) = 60;
- *Crossover Fraction* (fracção de cruzamento) = 0.6.

O parâmetro *Population Size* indica o tamanho da população, isto é, diz quantos indivíduos farão parte da população a cada geração. O parâmetro *Elite Count* indica o número de indivíduos mais bem adaptados na geração actual que são garantidos para sobreviver na próxima geração. Estes indivíduos são chamados de filhos de elite. Utilizando estes parâmetros, em cada geração existe 60 indivíduos que sobrevivem da geração anterior, e a restante população é criada por cruzamentos entre dois pais (60% da população) e por mutação.

No algoritmo implementado foi utilizado para o critério de paragem o número máximo de gerações (180), que não é o valor padrão do *toolbox* do *Matlab*.

Neste problema o espaço de busca é, relativamente, complexo, pois apresenta 4 variáveis de controlo com diferentes intervalos e restrições, tornando a solução do problema uma função com muitos máximos locais inclusive a solução óptima global poderá resultar de diferentes combinações dos parâmetros de controlo.

Como foi referido anteriormente, a população inicial criada é o ponto de partida para a evolução do algoritmo genético. Uma vez que o presente problema de optimização apresenta variáveis com intervalos de busca muito diferentes, no caso do modelo

no domínio da frequência foi necessário criar um ficheiro com o intervalo para cada frequência ω onde se encontra a melhor solução do problema, de modo a se restringir o espaço de busca perto da solução óptima global e acelerar o processo de optimização. Isto foi necessário realizar para o modelo da frequência para ondas regulares, pois estamos a trabalhar com valores exactos, enquanto que para o modelo estocástico não foi necessário porque neste são calculadas as variâncias dos parâmetros relevantes que caracterizam o comportamento do dispositivo.

Este ficheiro foi construído do seguinte modo, criou-se um programa em *Matlab* onde se assumiu como constantes os valores de k e x_{gm1} e para cada valor dentro dos intervalos permitidos para estas variáveis calculou-se os valores de D_L e K_L que maximizam a largura de captura para cada frequência ω . De seguida, o programa retira o valor máximo encontrado para a largura de captura e o valor das variáveis a que corresponde esse valor, e é obtido um ficheiro Excel com os intervalos de cada variável de controlo a partir dos valores encontrados para cada frequência ω . E assim, os indivíduos que compõem a população inicial são uniformemente distribuídos no domínio da melhor solução das variáveis de controlo.

O processo de optimização do modelo no domínio da frequência encontra-se esquematizado na figura 4.5 e o do modelo estocástico na figura 4.6.

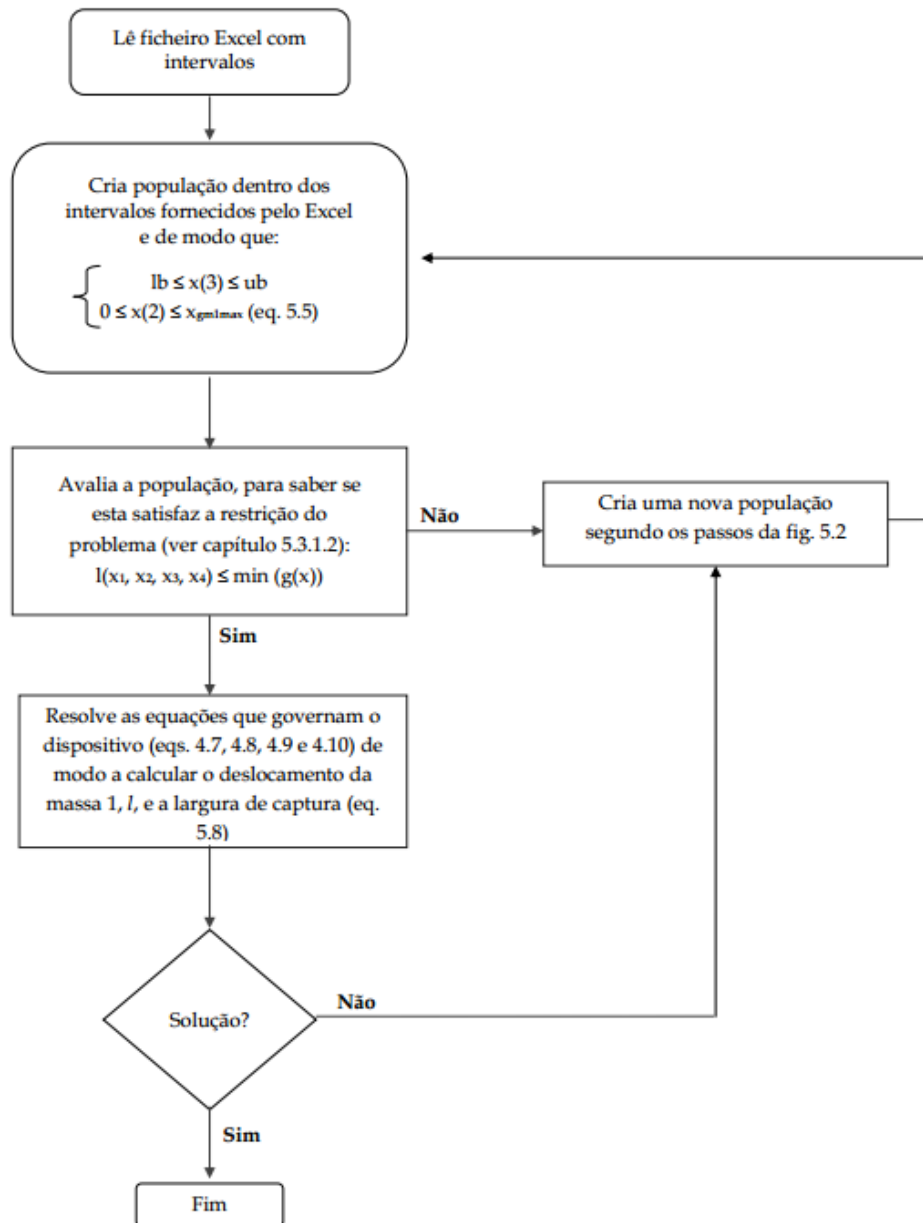


Figura 4.5: Fluxograma com o processo de optimização que ocorre no modelo no domínio da frequência.

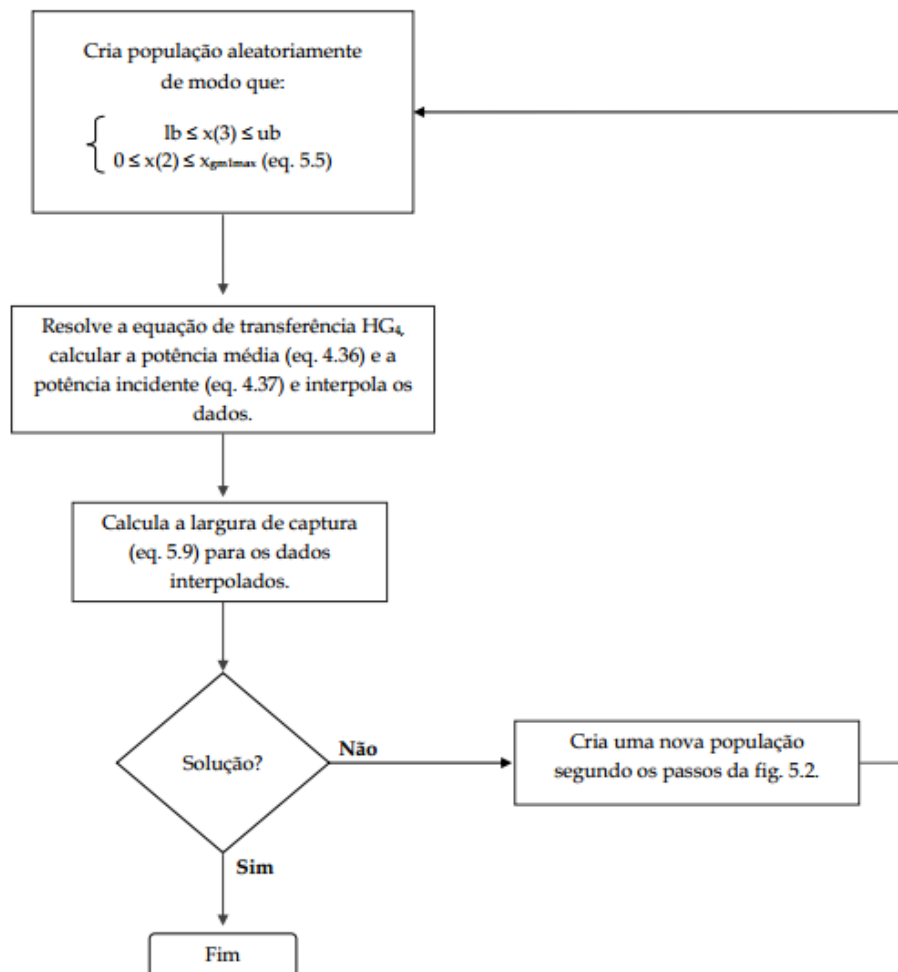


Figura 4.6: Fluxograma com o processo de otimização que ocorre no modelo estocástico.

4.4 Fluxograma dos Modelos Matemáticos

Obtidos os coeficientes hidrodinâmicos de massa adicional A_{ij} e de amortecimento B_{ij} , os coeficientes de restituição C_{ij} , os momentos de inércia I_{ij} e a força de difração F_{Di} , através do WAMIT, o passo seguinte foi a simulação do movimento do corpo oscilante no domínio da frequência para ondas regulares e irregulares (modelo estocástico). Para tal, foi desenvolvido no *software Matlab* um programa, para cada modelo, que simula o desempenho do sistema sob diversas situações.

O programa desenvolvido para o modelo no domínio da frequência para ondas regulares encontra-se esquematizado, de uma forma geral, na figura 4.8.

E o programa para o modelo estocástico, modelo no domínio da frequência para ondas irregulares, encontra-se sintetizado na figura 4.9. Para este modelo interpolou-se os dados de modo a melhorar a precisão do modelo. Antes da interpolação os dados são dados na gama de frequências de $0.15 \leq \omega \leq 2.1$ rad/s com um incremento de 0.0044 rad/s. Os dados são interpolados para obter dados dentro da mesma faixa de frequências com incrementos na frequência menores $\delta\omega_{int} = 1e^{-7}$ rad/s, ver figura 4.7 como exemplo. A interpolação dos dados é realizada utilizando *splines* cúbicos, através da função *spline* do *Matlab* [Morais and Vieira, 2013].

Notar que todos os integrais necessários calcular no modelo estocástico foram resolvidos através da função *trapz* do *Matlab* [Morais and Vieira, 2013], ver anexo C.

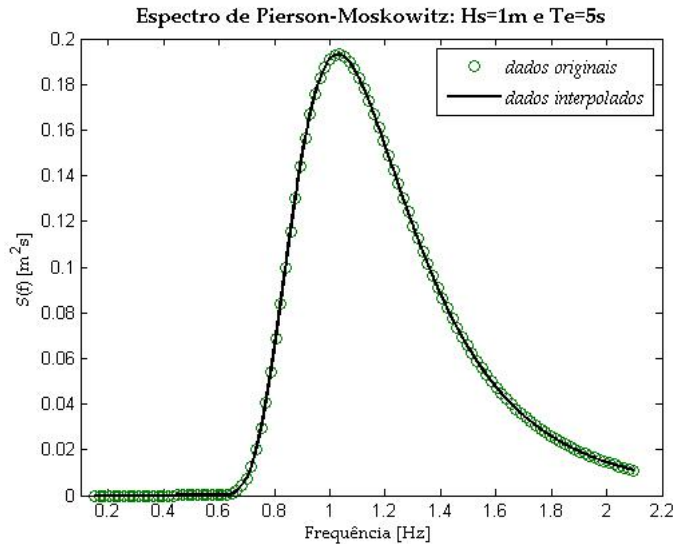


Figura 4.7: Exemplo da interpolação para o Espectro de Pierson-Moskowitz com $H_s = 1\text{m}$ e $T_e = 5\text{s}$: a verde são os dados originais, incremento de 0.0044 rad/s, e a preto os interpolados, incremento de 1×10^{-7} rad/s.

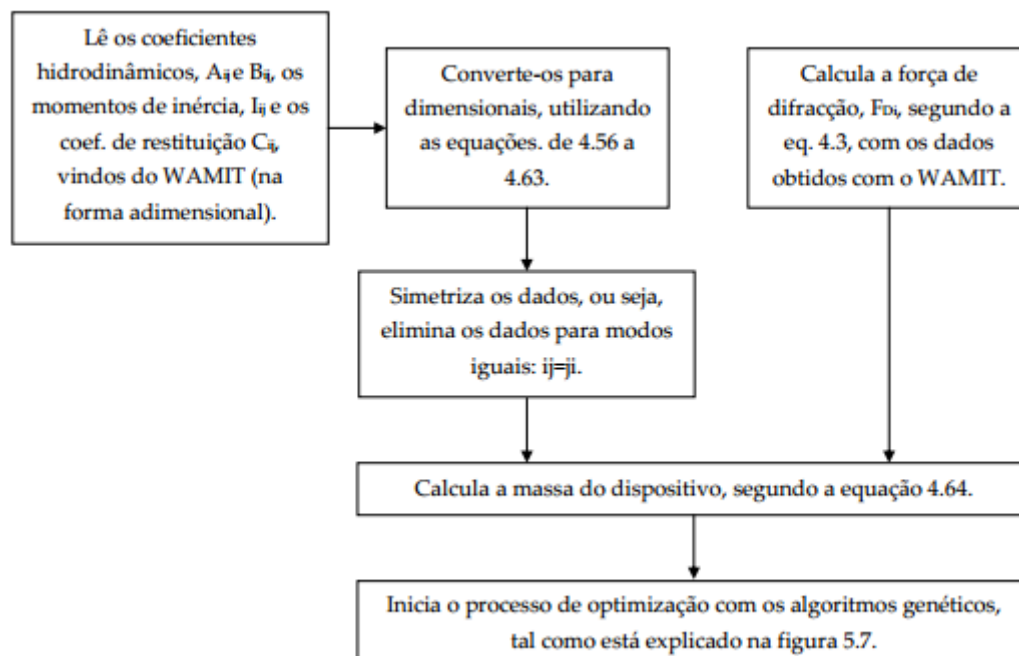


Figura 4.8: Fluxograma com o modelo no domínio da frequência.

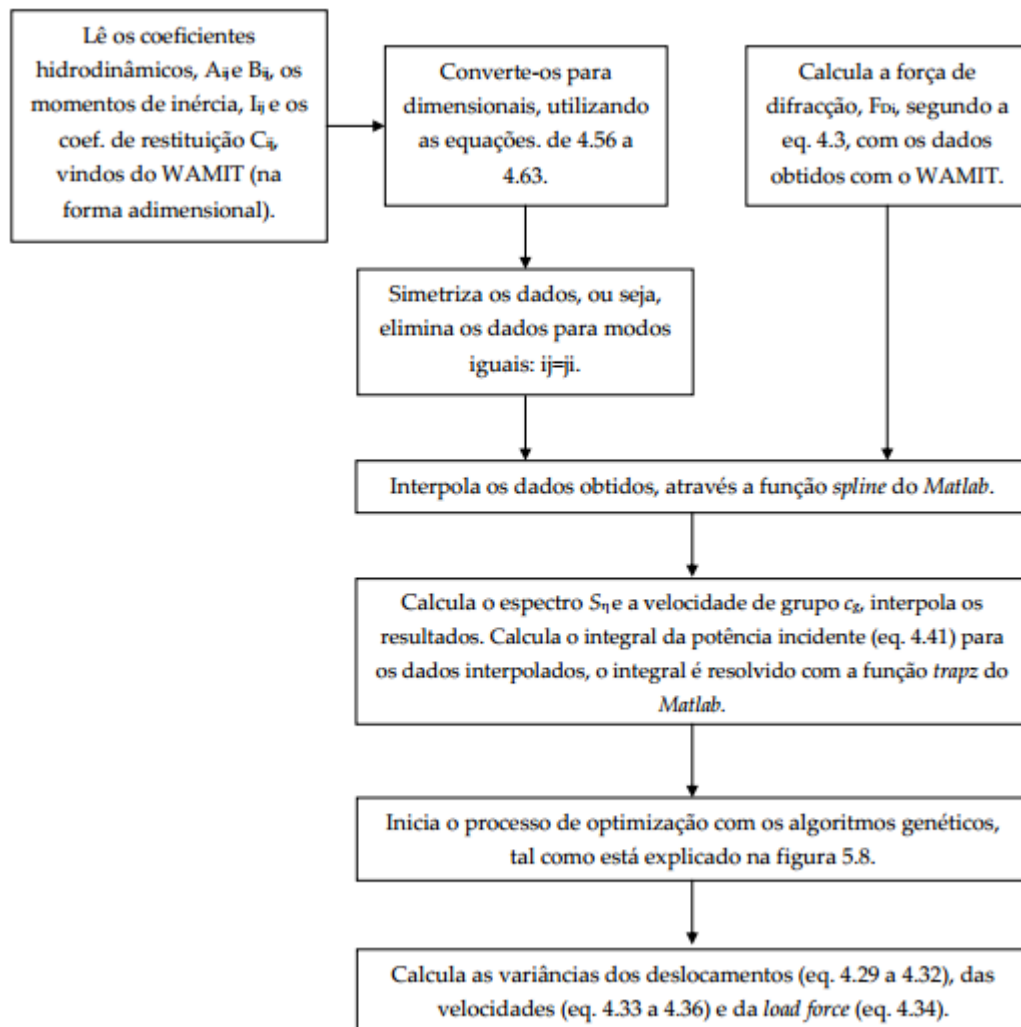


Figura 4.9: Fluxograma com o modelo estocástico.

5

Resultados e Discussão

5.1 Introdução

Para ilustrar a simulação do comportamento do dispositivo aplicando o processo de optimização utilizado no modelo no domínio da frequência e no modelo estocástico, obteve-se resultados para o corpo oscilante em estudo. Para o propósito deste trabalho assume-se que este dispositivo têm um comportamento hidrodinâmico linear. O *software* computacional utilizado para proceder os processos de simulação e modelagem foi o *Matlab*.

Utilizou-se o WAMIT para obter os coeficientes de radiação e a força de excitação para um conjunto de 441 frequências na gama $0.15 \leq \omega \leq 2.1$ rad/s (o que equivalente a períodos T de 2.99 a 41.89 s). Simulou-se para uma profundidade da água de 80 metros. Os resultados obtidos para ondas regulares referem-se a amplitudes de ondas incidentes de 1 metro. E para ondas irregulares referem-se a alturas significativas de 1 metro. Na costa portuguesa a altura significativa ronda em média os 2 metros.

Como referido na secção 3.3, na configuração linear adoptada para o sistema *power-take off* (PTO), presume-se que este é composto por um coeficiente de amortecimento D_L (componente activa da potência) e de mola K_L (componente reactiva da potência), eq. 3.6. A componente reactiva da potência que o sistema PTO consegue extrair do dispositivo pode tomar valores negativos, o que implicaria obter uma mola com um coeficiente de rigidez negativo, o que na prática é muito difícil de se obter. Assim, no processo de optimização considerou-se dois cenários para o sistema PTO: um cenário *a*) onde o sistema PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L ($K_L = 0$) e um cenário *b*) onde o sistema PTO é simulado pelo coeficiente de mola, K_L e coeficiente de amortecimento, D_L .

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos para a optimização do dispositivo para o modelo no domínio da frequência e para o mo-

delo estocástico, para os diferentes cenários adoptados para a massa da bóia ($M_b = 10\%, 15\%, 20\%, 25\%$ e $30\%M_T$) e do sistema PTO.

5.2 Modelo no Domínio da Frequência

Como foi referido anteriormente, um estudo no domínio da frequência em ondas regulares pode ser particularmente útil na afinação do dispositivo em frequências específicas, representativas do espectro de onda típico do sítio previsto de colocação. Se o dispositivo comportar-se eficientemente em ondas regulares em uma banda de frequências relativamente grande, então pode-se esperar que se comporte eficientemente para ondas irregulares com uma distribuição espectral abrangendo a mesma banda de frequências [Cândido and Justino, 2011].

Para o modelo no domínio da frequência, tendo em conta os cenários do sistema PTO, foram calculados para cada frequência ω os valores das variáveis de controlo D_L , X_{gmi} , k e K_L que maximizam a largura de captura do dispositivo. O valor de cada variável deve simultaneamente garantir as restrições impostas ao equilíbrio do sistema (secção 4.3.1.1), ao deslocamento da massa 1 e à coordenada x do centro de gravidade da massa 1 (secção 4.3.1.2).

5.2.1 Resultados

Da figura 5.1 à 5.6 encontram-se os resultados obtidos para o cenário *a*) do sistema PTO. As diferentes curvas referem-se aos diferentes cenários assumidos para a massa da bóia, $M_b = 10\%, 15\%, 20\%, 25\%$ e $30\%M_T$.

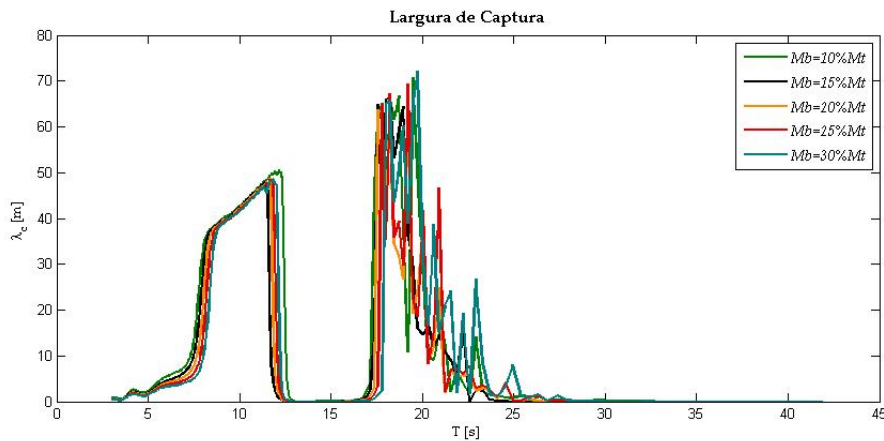


Figura 5.1: Largura de captura com frequência de ressonância, em metros, para os vários cenários da massa da bóia, $M_b = 10\%, 15\%, 20\%, 25\%, 30\%M_T$, assumindo que o PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L ($K_L = 0$), para ondas regulares.

Com base na equação 3.18 e 3.20 calculou-se a potência média extraída \hat{P}_u e a largura de captura λ_c do dispositivo, respectivamente, de modo a se poder caracterizar a eficiência global do dispositivo.

A figura 5.1 mostra os resultados obtidos para a largura de captura do dispositivo, é possível observar que entre os períodos de 17 s e os 27 s a largura de captura apresenta algumas irregularidades (existem oscilações de grande amplitude da largura de captura). Períodos para os quais temos maior densidade de energia associada para a costa portuguesa.

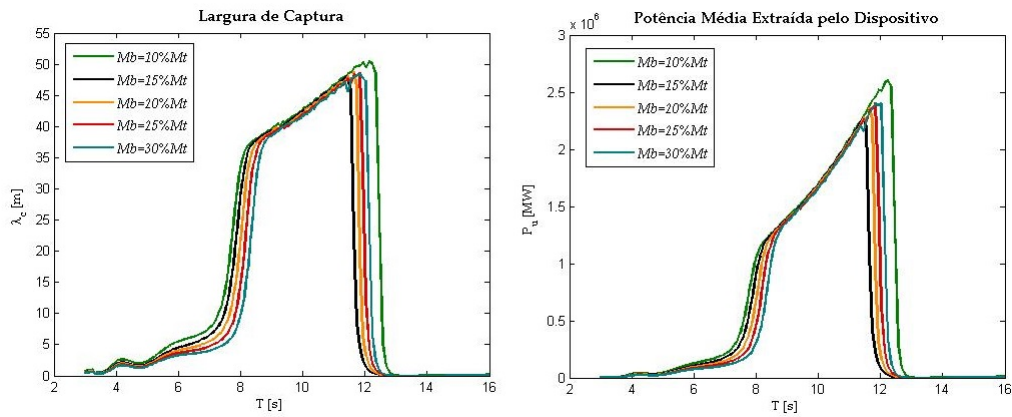


Figura 5.2: Largura de captura, em metros, (figura da esquerda) e potência média extraída pelo sistema PTO, em MW, (figura da direita) para os vários cenários da massa da bóia, $M_b = 10\%, 15\%, 20\%, 25\%, 30\% M_T$, assumindo que o PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L ($K_L = 0$), para ondas regulares.

Assim sendo, a figura 5.2 apresenta os resultados obtidos para a largura de captura do dispositivo (eq. 3.20), em metros, e para a potência média extraída pelo sistema PTO (eq. 3.18), em MW, até ao período de 16 s (para a costa portuguesa os períodos mais frequentes são entre os 8 s e os 12 s). É possível observar na fig. 5.2 que o dispositivo apresenta um patamar bem definido para a largura de captura e para a potência média extraída pelo sistema PTO, ambos dentro da mesma faixa de períodos, como seria de esperar uma vez que a largura de captura (eq. 3.20) depende da potência extraída pelo sistema PTO (eq. 3.18), entre os 7.5 s e 12.4 s.

Nota-se, também, que o aumento da massa da bóia, para os casos em que o valor da massa 1 pode ser no máximo 15% da massa total (ver na secção 4.3.1.1 a tabela 4.1), implica ligeiras reduções nos valores da largura de captura, e implica que o patamar da largura de captura e da potência média extraída se inicie em períodos de onda T maiores e acabe também em períodos maiores. Relativamente, ao caso em que $M_b = 10\% M_T$, onde o valor da massa 1 pode ser no máximo 20% da massa total, observa-se que o patamar apresenta uma área um pouco maior comparativamente aos outros casos, começando aos 7.2 s e terminando perto dos 12.7 s. É neste caso que os valores

de largura de captura e de potência média extraída apresentam melhores resultados, apresentando no máximo, aos 12.7 s, 50.5 metros de largura de captura o que implica uma potência extraída pelo dispositivo de 2.6 MW.

Para o cenário *a)* do sistema PTO, a potência média extraída, dada pela eq. 3.18, é otimizada, para cada período de onda, como uma função do coeficiente de amortecimento D_L (fig. 5.3), o valor deste deve simultaneamente assegurar a eficácia das restrições impostas no valor da massa 1 (fig. 5.4), no centro de gravidade da massa 1 (fig. 5.5) e nas amplitudes do deslocamento da massa 1 (fig. 5.6). Os maiores valores de D_L , representados na figura 5.3, ocorrem nos períodos correspondentes ao patamar da largura de captura e da potência média extraída pelo dispositivo (entre os 8 s e os 12 s) para todos os cenários da massa da bóia. Apresentando maiores valores para o caso em que $M_b = 10\%M_T$, provavelmente porque neste caso o valor da massa 1 apresenta uma massa maior o que implica existir maiores deslocamentos da massa e como resultado é necessário um maior amortecimento por parte do sistema PTO.

Deve-se notar que o coeficiente de amortecimento prova ser bastante sensível ao período de onda, por isso é que existem valores consideravelmente mais elevados e maiores variações de D_L numa banda relativamente estreita de períodos de onda, entre os 8 s e os 12 s.

Na gama de períodos entre os 8 s e os 12 s o coeficiente de amortecimento não mostra uma dependência muito grande da amplitude do deslocamento da massa 1, l , (fig. 5.6), apresentando valores mais elevados para valores de amplitudes mais baixas.

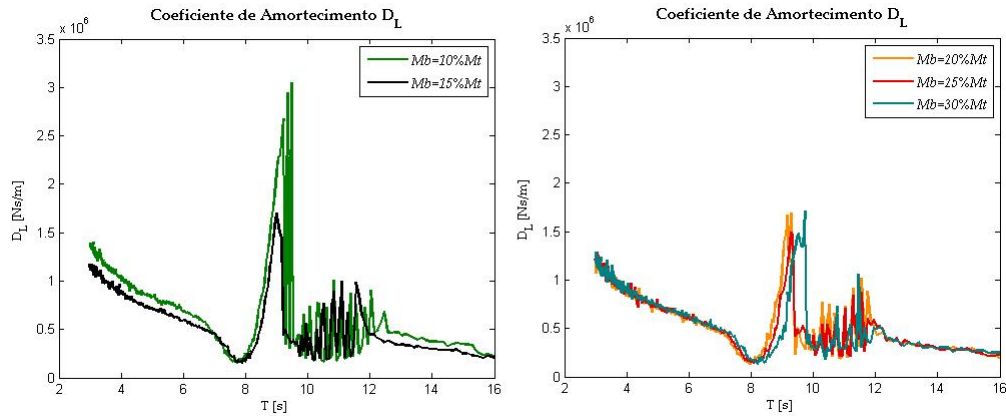


Figura 5.3: Coeficiente de amortecimento D_L para os vários cenários da massa da bóia: $M_b = 10\%, 15\%M_T$ (figura da esquerda) e $M_b = 20\%, 25\%, 30\%M_T$ (figura da direita), assumindo que o PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L ($K_L = 0$), para ondas regulares.

Na figura 5.4, observa-se os resultados obtidos da restrição relativa ao equilíbrio do dispositivo (secção 4.3.1.1). Esta restrição tinha que garantir que a coordenada z do centro de gravidade (CG) do dispositivo Z_g (eq. 3.58) estava sempre abaixo da

coordenada z do centro de flutuação (CF) do dispositivo Z_{CF} : $Z_g \leq Z_{CF}$. Para garantir a estabilidade do dispositivo o valor da massa 1 não podia ultrapassar os intervalos permitidos na tabela 4.1. Na figura 5.4, a figura da esquerda apresenta os valores obtidos para a coordenada z do centro de gravidade total do sistema, Z_g (eq. 3.58) e a figura da direita mostra o valor em percentagem do valor da massa 1. Verifica-se que o algoritmo garantiu para cada período de onda a restrição de equilíbrio do sistema, uma vez que a percentagem da massa 1 não ultrapassou os intervalos permitidos para cada M_b que consequentemente, garantiu que Z_g encontra-se sempre abaixo do Z_{CF} .

É no período de onda onde ocorre o patamar da largura de captura (fig. 5.2), que se observa uma maior variação do valor da massa 1 o que implica variações ao Z_g (fig. 5.4). Observa-se ainda que neste período o valor da massa 1 não toma o seu valor máximo permitido. No caso em que $M_b = 10\%M_T$, a massa pode atingir 20% da massa total do dispositivo, é possível verificar que a massa toma valores maiores que nos outros casos, o que implica maiores valores de potência extraída pelo dispositivo.

Verifica-se, também, na figura 5.4, para os casos em que $M_b = 15\%, 20\%, 25\%, 30\%M_T$, que valores mais elevados para a massa da bóia, M_b , implicam menores valores absolutos de Z_g (ver eq. 3.58).

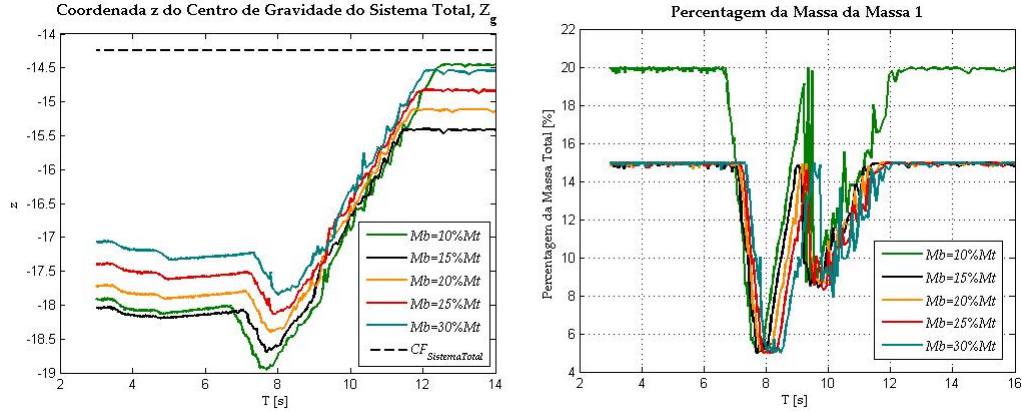


Figura 5.4: Resultados da restrição do equilíbrio do dispositivo: a figura da esquerda apresenta a coordenada z do centro de gravidade do sistema total e a figura da direita o valor da massa 1, para os vários cenários da massa da bóia, $M_b = 10\%, 15\%, 20\%, 25\%, 30\%M_T$, assumindo que o PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L ($K_L = 0$), para ondas regulares.

Os resultados da optimização para a coordenada x do centro de gravidade da massa 1 estão na figura 5.5. Segundo a eq. 4.7 o limite para a coordenada x do CG da massa 1 para o caso $M_b = 10\%M_T$ é $x = 16.17$ e para os restantes casos $x = 16.328$. Observa-se que a restrição imposta para a coordenada x do centro de gravidade da massa 1 foi garantida para todos os casos.

A figura 5.6 apresenta os resultados obtidos para a amplitude do deslocamento da

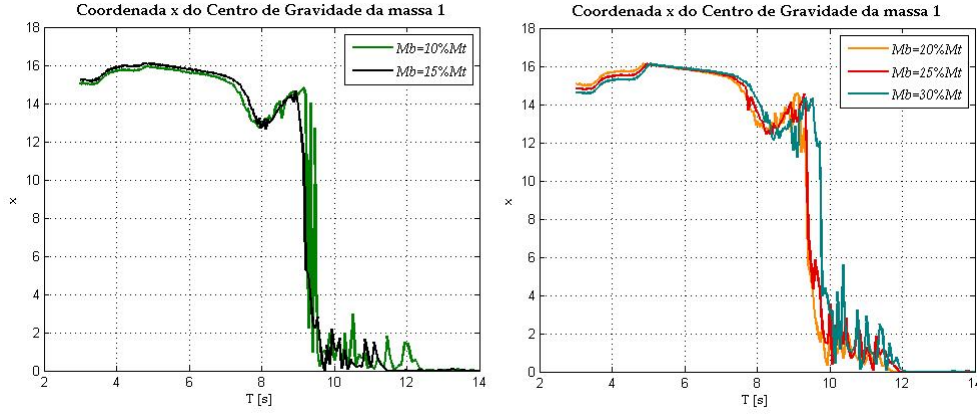


Figura 5.5: Resultados da restrição da coordenada x da massa 1 para os vários cenários da massa da bóia: $M_b = 10\%, 15\%M_T$ (figura da esquerda) e $M_b = 20\%, 25\%, 30\%M_T$ (figura da direita), assumindo que o PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L ($K_L = 0$), para ondas regulares.

massa 1, l , em metros, é a através deste deslocamento que é feita a produção de energia. A gama de períodos para qual ocorre o patamar com os maiores valores da amplitude do deslocamento, entre os 8 s e os 12 s, é a mesma onde ocorre o patamar na potência média extraída (como seria de esperar, uma vez que esta depende directamente da amplitude do deslocamento da massa, l , eq. 3.18) e da largura de captura. Grandes amplitudes do deslocamento da massa 1 implicam valores de potência média extraída elevados. Estes resultados permitem concluir que a potência média extraída e largura de captura do dispositivo mostram dependência da amplitude do deslocamento da massa 1.

Observa-se ainda que, no período entre os 8 s e os 12 s, quando o valor da massa 1 atinge valores menores (ver fig. 5.5) permite uma amplitude maior no deslocamento, e como resultado uma maior potência média extraída, o que seria de esperar, uma vez que é através do movimento desta massa que o dispositivo extraí energia.

Importa referir ainda que, na figura 5.6, com o aumento da massa da bóia, para os casos que a massa 1 pode ser no máximo 15% da massa total do dispositivo, as amplitudes do deslocamento da massa 1 aumentam. Enquanto que, no caso em que $M_b = 10\%M_T$ (onde a massa 1 pode representar no máximo 20% da massa total), as amplitudes do deslocamento são mais baixas para períodos entre os 7.5 s e os 12 s. Enquanto que, entre os 12 s e os 12.4 s apresenta maiores de deslocamento o que apresenta coerência com os resultados da largura de captura. Permite concluir que para um maior aproveitamento do dispositivo em estudo ter o valor da massa 1 maior permite, com menores amplitudes do deslocamento desta massa, obter melhores valores de largura de captura e para uma maior gama de períodos.

Para cada período de onda, calculou-se através da equação eq. 4.6 qual o percurso

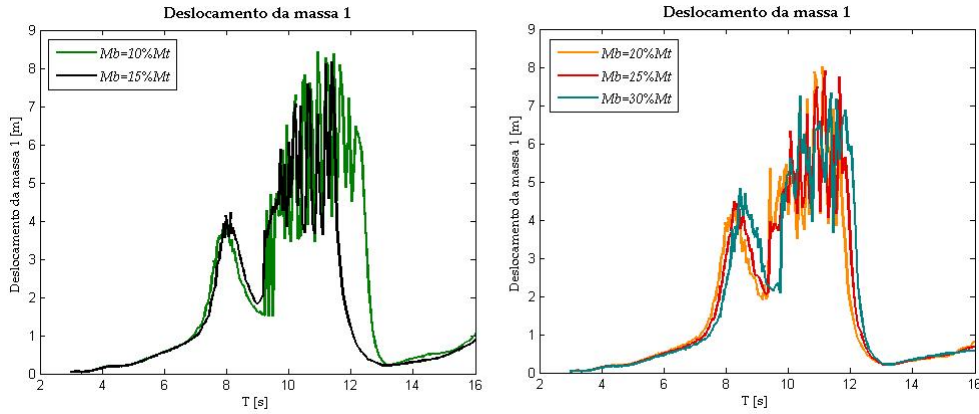


Figura 5.6: Amplitude do deslocamento da massa 1 para os vários cenários da massa da bóia: $M_b = 10\%, 15\%M_T$ (figura da esquerda) e $M_b = 20\%, 25\%, 30\%M_T$ (figura da direita), assumindo que o PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L ($K_L = 0$), para ondas regulares.

máximo que a massa 1 pode utilizar, tendo em conta o valor da variável de controlo $x_{g_{m1}}$, para se deslocar e verificou-se que a restrição aplicada ao deslocamento da massa 1 foi garantida.

Observa-se ainda que para se obter maiores valores de largura de captura a coordenada x do CG da massa 1 é menor (períodos entre os 10 s e os 12 s). Isto implica maiores amplitudes do deslocamento da massa 1 (fig. 5.6), pois com esta coordenada ela está a movimentar-se dentro do percurso maior permitido (ver secção 4.3.1.2).

Adicionalmente, se se considerar um controlo reactivo linear, simulado por um coeficiente de amortecimento D_L e mola K_L (cenário b)), é possível avaliar a resposta em frequências dos coeficientes, e assim permitir um plano de estratégias mais adequado do controlo para condições de ondas irregulares. As figuras 5.7 à 5.12 mostram os resultados obtidos para a simulação e optimização do dispositivo para o cenário b) do sistema PTO.

A figura 5.7 apresenta as curvas de largura de captura (fig. da esquerda) e da potência extraída pelo sistema PTO (fig. da direita) para o cenário b) do sistema PTO. Verifica-se que, comparativamente aos resultados obtidos para o cenário a) do sistema PTO (fig. 5.2), o dispositivo para o cenário b) apresenta uma melhor eficiência, uma vez que apresenta valores mais elevados para uma maior gama de períodos de onda (entre os 5 s e os 12 s).

Neste cenário b) do sistema PTO, a largura de captura é maximizada para cada período de onda, como função do coeficiente de amortecimento D_L e do de mola K_L , os valores destes (fig. 5.8 e 5.9, respectivamente) devem simultaneamente garantir as restrições impostas ao modelo (ver secção 4.3.1).

A figura 5.8 mostra que o coeficiente de amortecimento D_L toma valores mais ele-

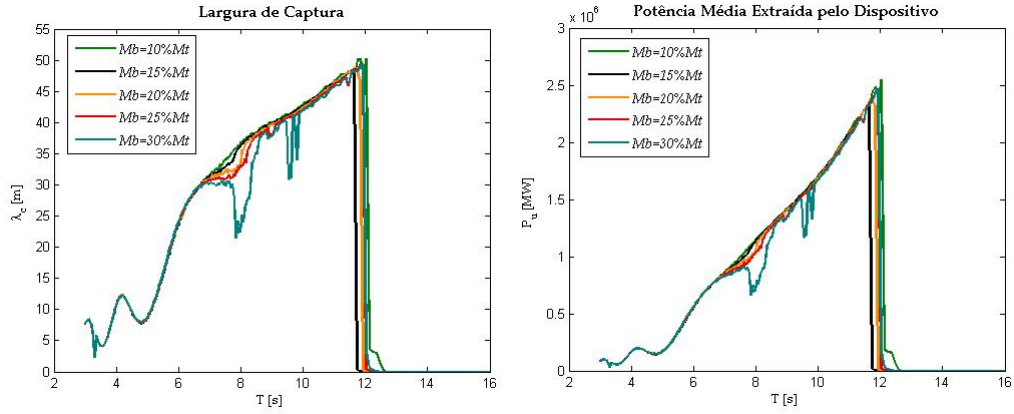


Figura 5.7: Largura de captura, em metros, (figura da esquerda) e potência média extraída pelo sistema, em MW, (figura da direita) para os vários cenários da massa da bóia, $M_b = 10\%, 15\%, 20\%, 25\%, 30\%M_T$, assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas regulares.

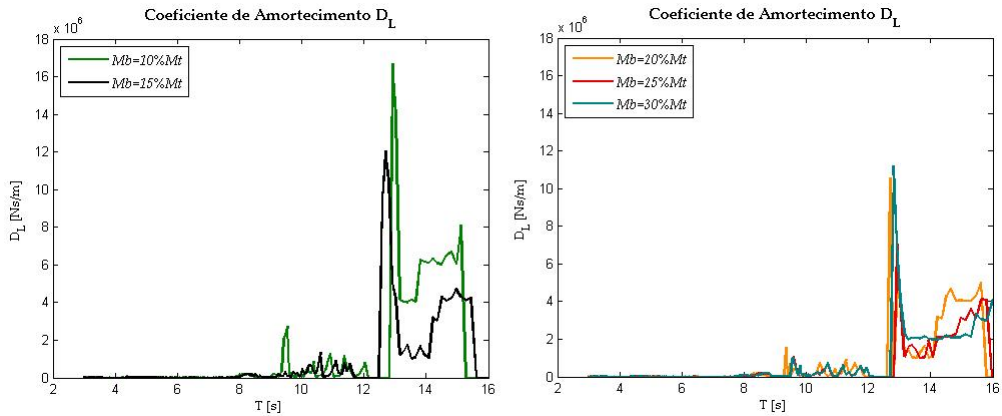


Figura 5.8: Coeficiente de amortecimento D_L para os vários cenários da massa da bóia: $M_b = 10\%, 15\%M_T$ (figura da esquerda) e $M_b = 20\%, 25\%, 30\%M_T$ (figura da direita), assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas regulares.

vados do que no cenário *a*) do sistema PTO, entre os 12.5 s e os 16 s. Notar, que estes valores mais elevados de D_L ocorrem fora do patamar da largura de captura. Dentro do patamar da largura de captura o D_L apresenta valores dentro da mesma gama de valores que no cenário *a*). Relativamente aos valores obtidos para K_L (fig. 5.9), estes apresentam valores mais elevados para menores valores de largura de captura, períodos menores que 6 s. Verifica-se ainda que K_L toma valores negativos para certos períodos de onda, entre os 10 s e os 12 s, onde o dispositivo apresenta uma melhor performance, pois é neste período que se obtêm os melhores valores para a largura de captura.

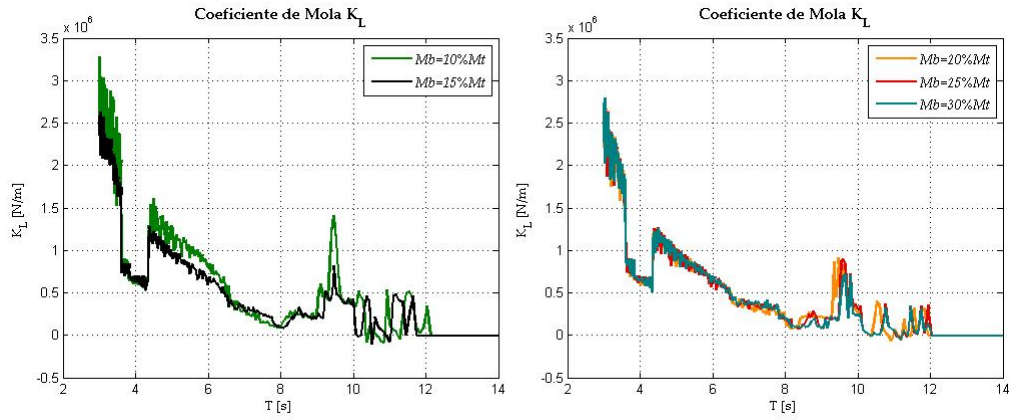


Figura 5.9: Coeficiente de mola K_L para os vários cenários da massa da bóia: $M_b = 10\%, 15\%M_T$ (figura da esquerda) e $M_b = 20\%, 25\%, 30\%M_T$ (figura da direita), assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas regulares.

Os resultados obtidos para a restrição imposta ao modelo relativa ao equilíbrio do dispositivo estão na figura 5.10. Tal como acontece no cenário *a*) a restrição foi garantida pelo algoritmo, uma vez que os intervalos permitidos (ver tabela 4.1) para a massa 1 para cada massa da bóia foram respeitados, e como resultado a coordenada z do centro de gravidade (CG) do dispositivo encontra-se sempre abaixo do centro de flutuação (CF).

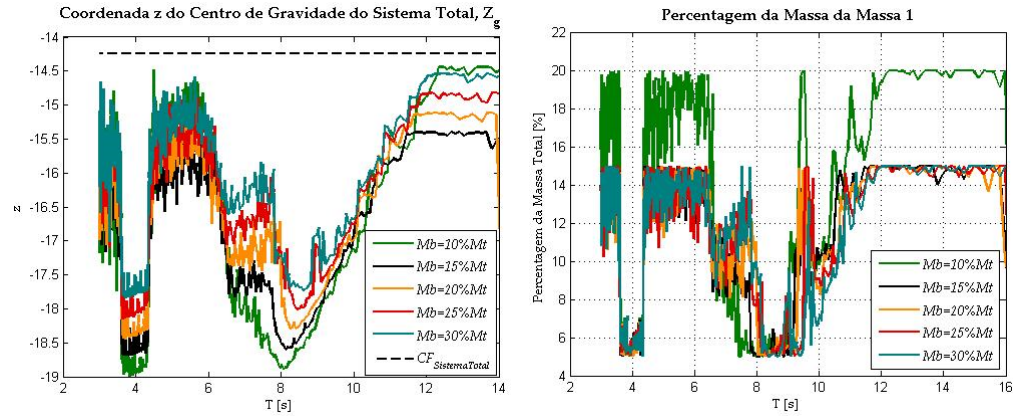


Figura 5.10: Resultados da restrição de equilíbrio do dispositivo: a figura da esquerda apresenta a coordenada z do centro de gravidade do dispositivo e a figura da direita o valor da massa 1, para os vários cenários da massa da bóia, $M_b = 10\%, 15\%, 20\%, 25\%, 30\%M_T$, assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas regulares.

A figura 5.11 apresenta os resultados para a coordenada x do centro de gravidade da massa 1. As curvas para cada massa da bóia apresentam padrões semelhantes, sendo que, tal como no cenário *a*), para se obter maiores valores de largura de captura

a coordenada x do CG da massa 1 mostra ser mais baixa (períodos entre os 10 s e os 12 s).

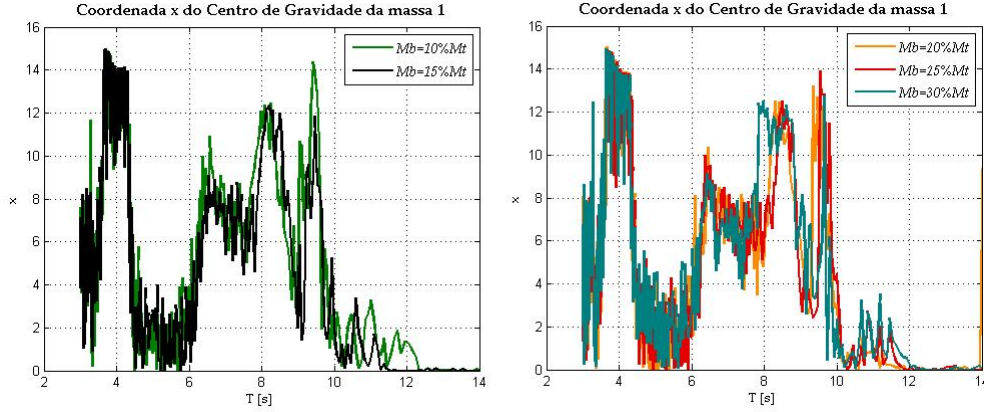


Figura 5.11: Resultados da restrição da coordenada x da massa 1 para os vários cenários da massa da bóia, $M_b = 10\%, 15\%M_T$ (figura da esquerda) e $M_b = 20\%, 25\%, 30\%M_T$ (figura da direita), assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas regulares.

As curvas do resultados obtidos para as amplitudes do deslocamento da massa 1, para o cenário $b)$, estão representadas na fig. 5.12. Como no cenário $a)$ é dentro da gama de maiores valores de largura de captura que ocorrem as maiores amplitudes do deslocamento da massa 1, tal como seria previsto, uma vez que é através do deslocamento desta massa que o dispositivo extraí energia.

Tal como se fez para o cenário $a)$, calculou-se, para cada período de onda, qual o percurso máximo que a massa 1 pode utilizar para se deslocar, tendo em conta o valor da variável de controlo x_{gm1} , e verificou-se que a restrição foi garantida.

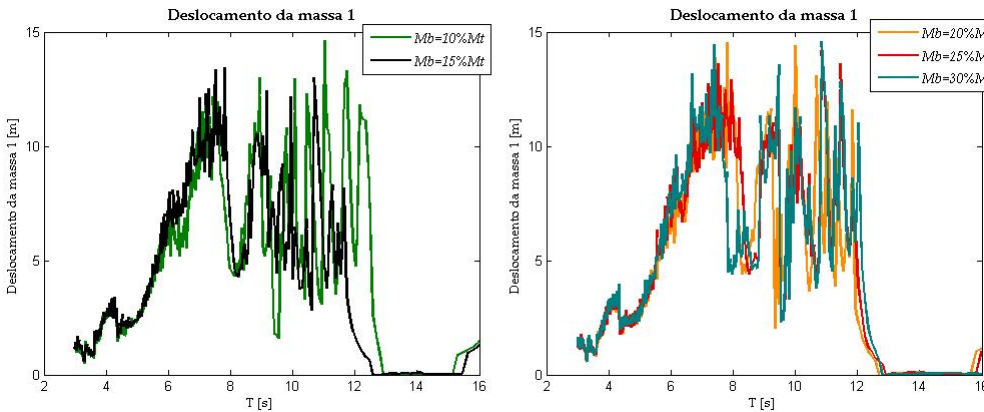


Figura 5.12: Amplitude do deslocamento da massa 1 para os vários cenários da massa da bóia: $M_b = 10\%, 15\%M_T$ (figura da esquerda) e $M_b = 20\%, 25\%, 30\%M_T$ (figura da direita), assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas regulares.

5.2.2 Discussão

Neste modelo, modelo no domínio da frequência para ondas regulares, o dispositivo mostra bons resultados de largura de captura (fig. 5.2 e 5.7) para uma elevada gama de períodos de onda para ambos os cenários do sistema PTO: cenário *a*) o sistema de PTO só é simulado com o coeficiente de amortecimento D_L e cenário *b*) é simulado com o coeficiente de amortecimento D_L e mola K_L .

Para ambos os cenários do sistema de PTO os resultados obtidos para simular o comportamento do dispositivo apresentavam algumas irregularidades entre o período de 17 s e os 27 s, oscilações de grandes amplitudes, isto acontece, provavelmente, porque esta gama de períodos são períodos de ressonância do dispositivo.

É verificado nas figs. 5.2 e 5.7 uma quebra da largura de captura perto dos 12 s. Abaixo deste valor o dispositivo apresenta uma boa performance, apresentando valores perto dos 2.5 MW de potência extraída.

Constatou-se resultados ligeiramente melhores de performance do dispositivo quando o sistema PTO é modelado com D_L e K_L , uma vez que neste cenário a largura de captura (fig. 5.7) apresenta valores mais elevados para uma gama maior de períodos de onda.

A largura de captura varia com a massa da bóia M_b , para ambos os cenários, quanto maior a massa da bóia menor o máximo da largura de captura do dispositivo. No caso em que o valor da massa 1 pode tomar valores mais elevados (caso em que $M_b = 10\%M_T$) obtêm-se valores mais elevados de largura de captura. O que permite concluir que a potência extraída pelo dispositivo depende directamente do valor da massa 1. Com uma bóia mais leve e uma massa deslizante mais pesada obtêm-se melhores resultados.

Observa-se na figura 5.3 e 5.8 que D_L obtêm valores mais elevados para o cenário *b*), apresentando os maiores valores fora da gama do patamar da largura de captura. Dentro do patamar da largura de captura, para ambos os cenários, os valores de D_L variam dentro de uma gama semelhante de valores. Para ambos os cenários, D_L mostra-se ser sensível ao período de onda, uma vez apresenta valores consideravelmente mais elevados e com maiores variações numa banda relativamente estreita de períodos de onda.

Relativamente ao coeficiente de mola K_L , figura 5.9, este apresenta valores negativos quando se dá o máximo dos valores para a largura de captura. Os valores negativos de K_L implicam obter uma mola com coeficiente de rigidez negativo, o que na prática é muito difícil de se obter.

Para a restrição imposta ao modelo relativa ao equilíbrio do dispositivo (secção 4.3.1.1), a figura 5.4 e 5.10 mostra, para ambos os cenários, que a restrição foi garantida. Visto que a coordenada z do centro de gravidade do dispositivo encontra-se sempre

abaixo do centro de flutuação deste.

Para ambos os cenários, para os casos em que $M_b = 15\%, 20\%, 25\%$ e $30\%MT$, quanto maior o valor da massa da bóia M_b menor o módulo da coordenada z do CG do dispositivo e menor captura de largura.

A restrição imposta à coordenada x do CG da massa 1 foi garantida pelo optimização, como é possível observar na figura 5.5 e 5.11.

As amplitudes do deslocamento da massa 1 estão apresentadas na figura 5.6 para o cenário *a*) e na figura 5.12 para o cenário *b*). Em ambos os cenários a gama de períodos para qual ocorre o patamar da amplitude do deslocamento é a mesma para qual ocorrem os maiores valores de potência média extraída pelo dispositivo. Como seria de esperar, e como os resultados demonstram, a potência média extraída (eq. 3.18) e a largura de captura (eq. 3.20) do dispositivo mostram uma certa dependência da amplitude do deslocamento.

A restrição imposta à amplitude do deslocamento da massa 1 foi garantida para ambos os cenários do PTO. Para se ter a certeza que o modelo garantia a restrição, calculou-se para cada período de onda através da eq. 4.6 qual o percurso máximo que a massa 1 podia utilizar, tendo em conta o valor da variável de controlo $x_{g_{m1}}$, para se deslocar.

Para este modelo e para ambos os cenários considerados do sistema PTO, é possível observar que os resultados obtidos para algumas das variáveis de controlo do problema de optimização da performance do dispositivo apresentam curvas bastante irregulares. O problema de optimização explicado neste trabalho apresenta várias variáveis de controlo e diferentes restrições o que resulta, para este caso, existir muitas soluções locais para cada frequência quando se optimiza os diferentes parâmetros de controlo. Criando assim, uma solução mal comportada pelo que o algoritmo apresenta dificuldade em convergir para a solução óptima global para cada frequência, o que poderá explicar o fenómeno da irregularidade das curvas.

5.3 Modelo Estocástico

Os resultados obtidos no modelo estocástico representam o comportamento do dispositivo para ondas irregulares reais no domínio da frequência. As ondas irregulares reais podem ser representadas, com uma boa aproximação, como a sobreposição de ondas regulares, definindo um espectro (ver anexo A para mais detalhes). Se todas estas tiverem a mesma direcção de propagação temos um espectro unidimensional. Se tivermos em conta a frequência e a direcção de propagação o espectro é bi-dimensional. Neste caso considera-se apenas o espectro unidimensional [Falcão, 2007].

Para um determinado estado de mar, as ondas reais são caracterizadas pela altura

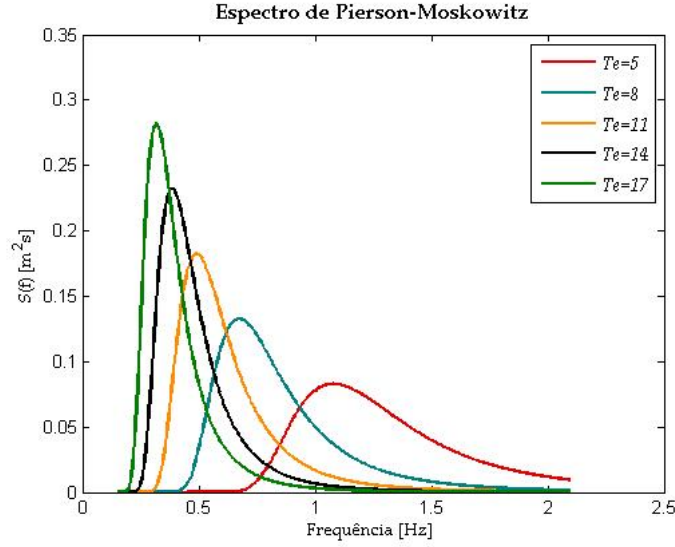


Figura 5.13: Espectro de Pierson-Moskowitz para $H_s = 1\text{m}$ e $T_e = 5\text{s}$, $T_e = 8\text{s}$, $T_e = 11\text{s}$, $T_e = 14\text{s}$ e $T_e = 17\text{s}$.

de onda H_s , período de energia T_e , e por um espectro tipo. O espectro de frequência $S_\eta(\omega)$ adoptado para representar o estado do mar, que é o mais utilizado na literatura, foi o de Pierson-Moskowitz (ou sua variante) (ver anexo A para mais detalhes deste espectro) [Holthuijsen, 2007]:

$$S_\eta(\omega) = 263H_s^2T_e^{-4}\omega^{-5}\exp(-1054T_e^{-4}\omega^{-4}), \quad (5.1)$$

Os valores médios para a potência útil e largura de captura são obtidos para diferentes condições do mar. Os cálculos neste capítulo são realizados para diferentes estados do mar de referência. O comportamento do dispositivo foi simulado para períodos de energia das ondas, T_e , de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s e para H_s igual a 1 m. A figura 5.13 apresenta o cálculo do espectro Pierson-Moskowitz, eq. 5.1, para alguns dos estados do mar considerados.

Para o modelo estocástico foram otimizados os valores de D_L , X_{gmi} , k e K_L que maximizam a largura de captura do dispositivo, para o cenário a) do sistema PTO¹, para cada estado do mar considerado. Neste modelo as variáveis de controlo do problema de optimização do dispositivo são optimizadas para cada período de energia T_e . O valor de cada variável de controlo deve garantir as restrições impostas ao sistema para este modelo, que são relativas ao equilíbrio do dispositivo (secção 4.3.1.1) e à coordenada x do centro de gravidade da massa 1 (secção 4.3.1.2).

¹O modelo estocástico só foi avaliado para o cenário b) do sistema PTO para o caso em que $M_b = 10\%M_T$ por falta de tempo.

5.3.1 Resultados

Da figura 5.14 à 5.19 estão os resultados obtidos para o modelo estocástico da otimização para o cenário *a*) do sistema PTO, isto é, assumindo que o sistema PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L . Tal como no modelo no domínio da frequência para ondas regulares, as diferentes curvas referem-se aos diferentes cenários assumidos para a massa da bóia, $M_b = 10\%, 15\%, 20\%, 25\%$ e $30\%M_T$.

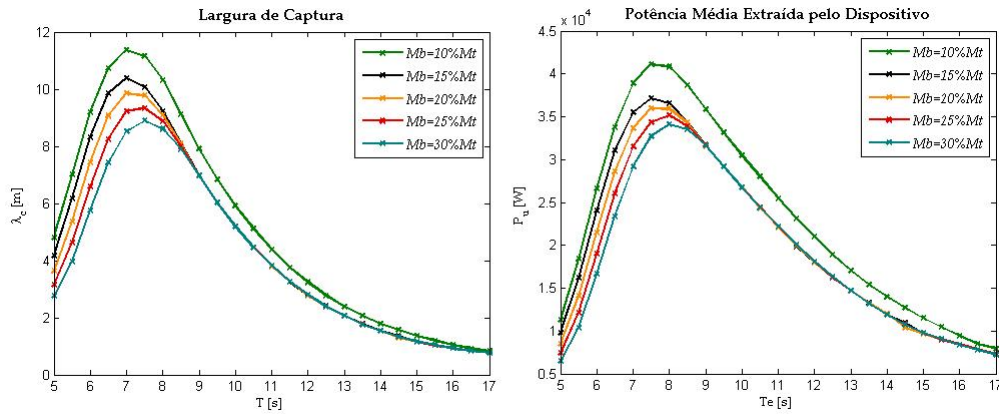


Figura 5.14: Largura de captura (figura da esquerda) e potência média extraída pelo dispositivo (figura da direita) para períodos de energia de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s e H_s igual a 1 m, assumindo que o sistema PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L , para ondas irregulares.

A figura 5.14 apresenta os resultados obtidos para a largura de captura λ_c (eq. 4.2) (fig. da esquerda) e para a potência média extraída pelo dispositivo (eq. 3.43) (fig. da direita), para cada massa da bóia M_b , e para os diferentes períodos de energia Te . As figuras mostram coerência nos resultados, existindo um padrão semelhante das curvas. A figura mostra também que o dispositivo tem melhores performances para estados do mar com períodos de energia menores, $Te \leq 8$ s. É possível também observar que, para os casos em que $M_b = 15\%, 20\%, 25\%$ e $30\%M_T$, quanto maior é a massa da bóia, menor é a potência extraída pelo dispositivo e consequentemente menor é a largura de captura. Neste casos, a largura de captura a partir do período de energia de 9 s tende para os mesmos valores, tal não acontece no cenário em que a massa da bóia representa 10% da massa total do dispositivo, onde a largura de captura é maior para todos os períodos de energia adoptados. Tal deve-se, provavelmente, ao facto de o limite que o valor da massa 1 pode tomar no cenário $M_b = 10\%M_T$ ser maior (pode representar até 20% da massa total do dispositivo, enquanto nos outros cenários no máximo representa 15%, ver tabela 4.1).

Deve-se notar que o cálculo do coeficiente de amortecimento D_L que maximiza a potência média útil, eq. 3.43, para cada estado do mar, é definido por valores de H_s e Te . Considerando que, na teoria linear, as ondas irregulares são concebidas como

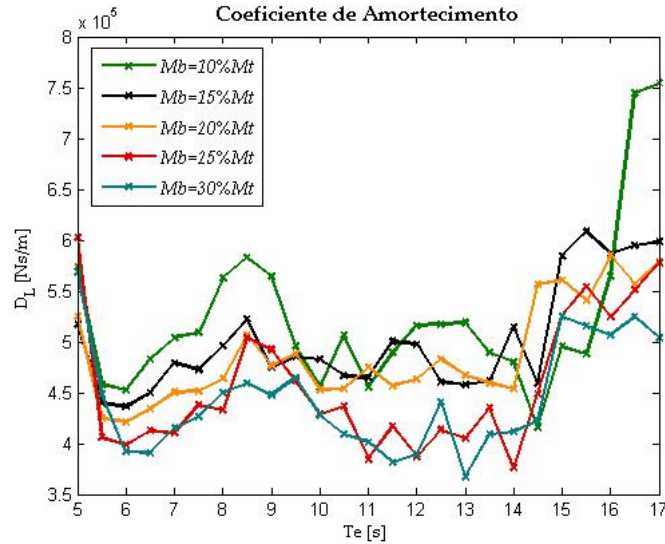


Figura 5.15: Coeficiente de amortecimento mecânico D_L para H_s igual a 1 m e T_e de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s, assumindo que o sistema PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L , para ondas irregulares.

uma superposição de ondas regulares (distribuição espectral), e que o coeficiente de amortecimento D_L ótimo obtido em ondas regulares provou depender fortemente do período de onda T (fig. 5.3 e 5.8), o dispositivo não pode ser otimizado simultaneamente para todas as frequências do espectro (ondas irregulares). Por isso, o D_L ótimo obtido para ondas irregulares (fig. 5.15) pode ser apropriado para uma banda estreita, e não para a maioria das frequências.

A figura 5.16 apresenta os resultados obtidos da restrição imposta no modelo relativamente ao equilíbrio do dispositivo (capítulo 4.3.1.1). Como é possível observar a restrição de equilíbrio do sistema foi garantida, uma vez que para cada M_b o valor da massa 1 (que é uma percentagem da massa total, eq. 3.16) não ultrapassou os limites permitidos, ver tabela 4.1, e como resultado a coordenada z do centro de gravidade total do dispositivo, Z_g , encontra-se sempre abaixo da coordenada z do centro de flutuação do dispositivo, Z_{CF} . É nos casos com menores períodos de energia ($T_e \leq 6.5$ s) que o valor da massa 1 apresenta menores valores, a partir de $T_e = 7$ s o valor da massa 1 encontra-se sempre no seu máximo. Quando ocorre o pico da largura de captura para todos os casos (períodos de energia entre os 7 s e os 7.5 s, fig. 5.14) o valor da massa 1 encontra-se no seu máximo. É importante referir ainda que, o valor da massa 1 influencia Z_g , quanto maior a massa maior é o valor absoluto de Z_g , e maiores valores de largura de captura. Este resultado permite concluir que a largura de captura depende do valor da massa 1, e que quanto maior for o valor da massa 1 maior a largura de captura.

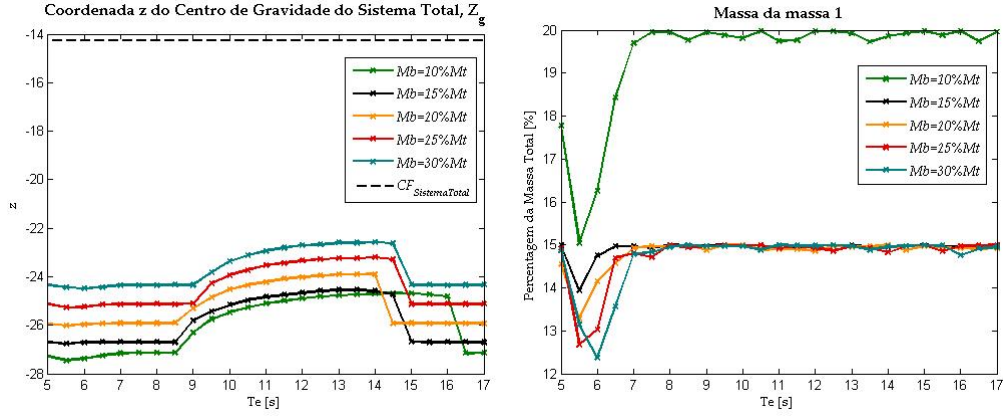


Figura 5.16: Resultados da restrição de equilíbrio do dispositivo: coordenada z do CG do sistema total Z_g (figura da esquerda) e valor da massa 1 em percentagem da massa total do dispositivo (figura da direita), para H_s igual a 1 m e T_e de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s, assumindo que o sistema PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L , para ondas irregulares.

Na figura 5.17 estão apresentados os resultados da restrição imposta ao modelo relativos à coordenada x do centro de gravidade da massa 1. É possível verificar, através da equação 4.7, que a restrição é garantida pelo modelo.

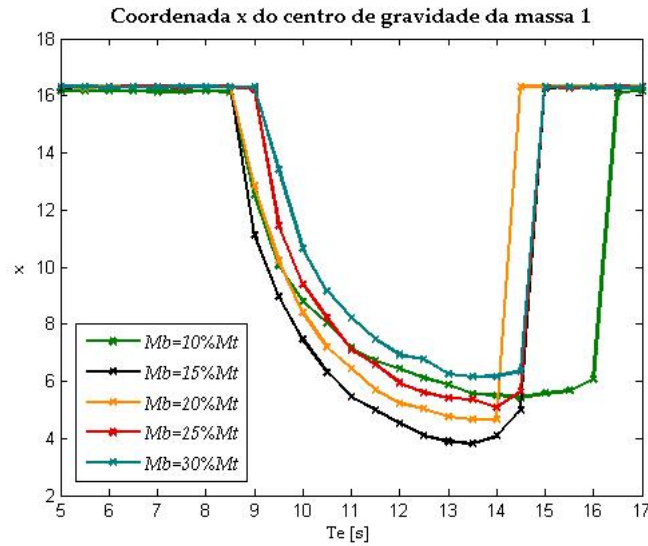


Figura 5.17: Coordenada x do centro de gravidade da massa 1 para H_s igual a 1 m e T_e de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s, assumindo que o sistema PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L , para ondas irregulares.

A figura 5.18 apresenta a variância do deslocamento da massa deslizante 1 (eq. 3.35), é através do movimento desta que é feita a produção de energia. Neste cenário

a), com um sistema PTO não-reactivo, a variância do deslocamento da massa apresenta padrões aproximadamente iguais para os vários cenários da massa da bóia. O pico da variância do deslocamento da massa 1 dá-se quando ocorre o pico para a largura de captura do dispositivo (fig. 5.14), entre os 7 e 7.5 s, como seria de esperar.

Na figura 5.18 também é possível observar que quando se aumenta a massa da bóia, mantendo o valor da massa 1 (fig. 5.16) (para os casos em que $M_b = 15\%, 20\%, 25\%$ e $30\%M_T$), a variância do deslocamento da massa 1 também aumenta, enquanto que a largura de captura diminui (fig. 5.14). Por exemplo, quando ocorre o pico na largura de captura (fig. 5.14) para o caso em que $M_b = 15\%M_T$ a variância do deslocamento da massa 1 ronda os 0.135 m^2 para obter perto de 10.3 m de largura de captura, enquanto que no caso em que $M_b = 30\%M_T$ a variância do deslocamento é de aproximadamente 0.145 m^2 e só se obtêm cerca de 9 m de largura de captura do dispositivo. Isto é, com a diminuição da massa da bóia, a massa 1 não necessita de ter um deslocamento tão grande para obter melhores resultados para a largura de captura.

No caso, em que o valor da massa 1 pode ter no máximo 20% da massa total do dispositivo (caso em que $M_b = 10\%M_T$), nota-se que a variância do deslocamento da massa 1 é superior para alguns períodos de energia e menor para outros, do que quando o valor da massa 1 só pode ter no máximo $15\%M_T$.

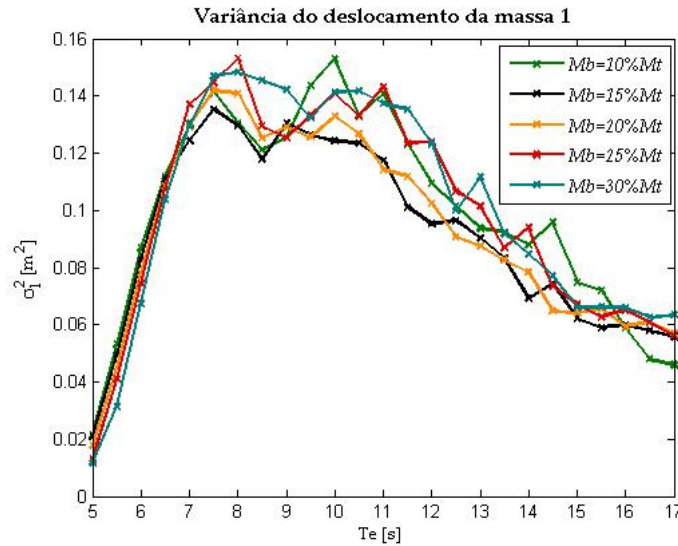


Figura 5.18: Variância do deslocamento da massa 1 para H_s igual a 1 m e T_e de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s, assumindo que o sistema PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L , para ondas irregulares.

Observa-se na figura 5.19 os resultados obtidos para a variância da força exercida pelo sistema PTO (*load force*), F_L , na massa 1, equação 3.41. Verifica-se um padrão das curvas semelhante para todos os casos de M_b , sendo para que para o caso em que

$M_b = 10\%M_T$ observam-se os maiores valores e nos restantes casos quanto maior a massa da bóia menor a variância da *load force*, o que é consistente com os resultados obtidos para a largura de captura (fig. 5.14).

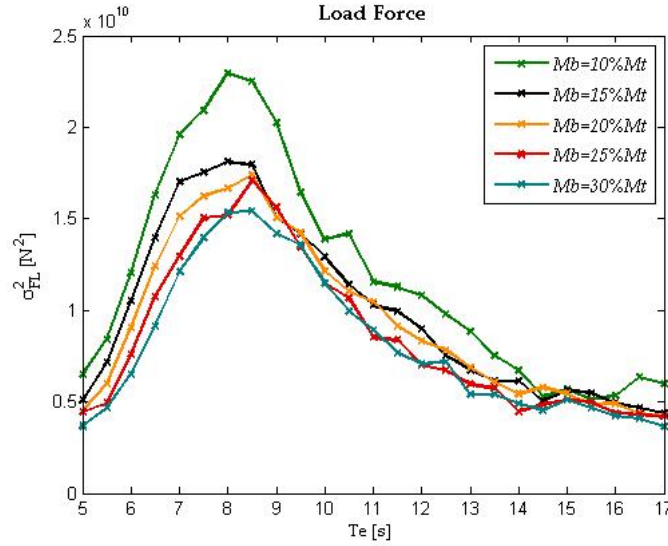


Figura 5.19: *Load Force* para H_s igual a 1 m e T_e de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s, assumindo que o sistema PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L , para ondas irregulares.

A figura 5.20 à 5.24 mostram os resultados para o modelo estocástico quando considerado um controlo reactivo linear, isto é, um sistema PTO simulado por um coeficiente de amortecimento D_L e mola K_L (cenário *b*). Para este cenário *b* do sistema PTO só se simulou o comportamento do dispositivo para um valor da massa da bóia ($M_b = 10\%M_T$)².

A figura 5.20 mostra as curvas da largura de captura (fig. da esquerda) e da potência média extraída pelo sistema PTO (fig. da direita) para o cenário *b* (linha a verde) e para o cenário *a* (linha laranja) para o caso que $M_b = 10\%M_T$. Verifica-se que o comportamento do dispositivo é melhor quando simulado com um controlo reactivo linear (cenário *b*).

Neste cenário *b* do sistema PTO, a largura de captura do dispositivo é maximizada para cada período de onda, como função do coeficiente de amortecimento D_L e do de mola K_L , e os valores destes (fig. 5.21) devem simultaneamente garantir as restrições impostas ao modelo (ver secção 4.3.1).

Para o caso em que $M_b = 10\%M_T$, o coeficiente de amortecimento D_L para o cenário *b*, figura 5.21 da esquerda, apresenta valores mais baixos do que para o cenário *a*.

²Só se avaliou o modelo estocástico para este cenário do sistema PTO com este valor da massa da bóia ($M_b = 10\%M_T$) por falta de tempo

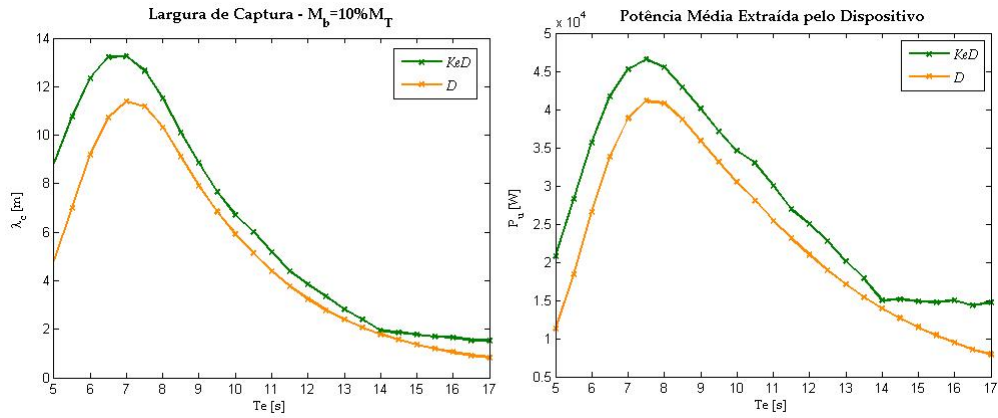


Figura 5.20: Comparação dos resultados da largura de captura e da potência média extraída pelo dispositivo quando $M_b = 10\%M_T$ para os dois cenários considerados para o PTO, para ondas irregulares.

Verifica-se que os valores obtidos para K_L , figura 5.21 da direita, não tomam valores negativos.

A figura 5.22 apresenta os resultados obtidos para a restrição imposta ao modelo relativa ao equilíbrio do dispositivo. A restrição para cada período de energia foi garantida pelo algoritmo, uma vez que o intervalo permitido para a massa 1 para este caso da massa da bóia (ver tabela 4.1) foi respeitado, e assim a coordenada z do centro de gravidade do dispositivo encontra-se sempre abaixo do centro de flutuação do dispositivo.

Os resultados obtidos da restrição imposta ao modelo relativos à coordenada x do centro de gravidade da massa 1 encontram-se na figura 5.23. É possível verificar, através da equação 4.7 que a restrição é garantida.

A figura 5.24 apresenta os resultados da variância do deslocamento da massa 1. Verifica-se que, tal como no cenário *a)* do sistema PTO, não é quando ocorre o pico da largura de captura que ocorre o pico da variância do deslocamento.

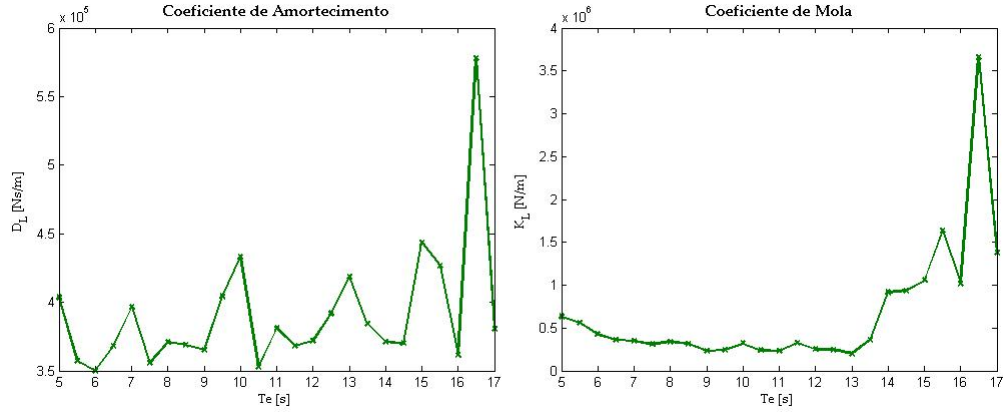


Figura 5.21: Coeficiente de amortecimento (figura da esquerda) e coeficiente de mola (figura da direita) para o cenário da massa da bóia: $M_b = 10\%M_T$, assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas irregulares.

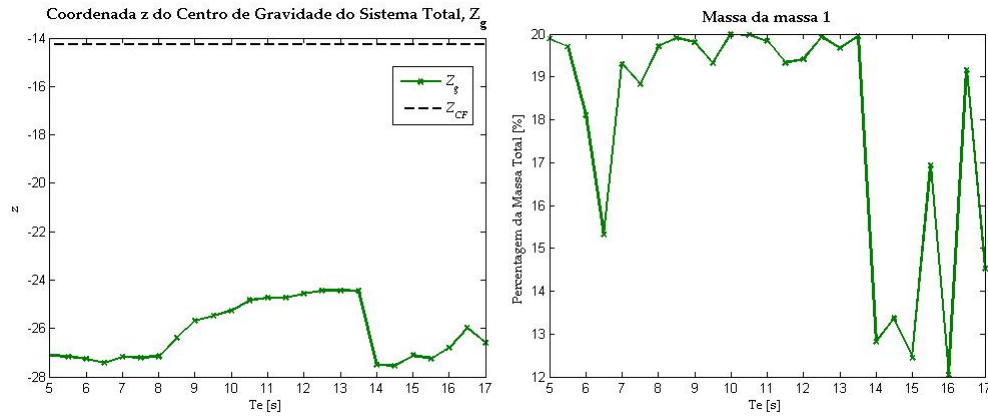


Figura 5.22: Resultados da restrição de equilíbrio do dispositivo: coordenada z do CG do sistema total Z_g (figura da esquerda) e valor da massa 1 (figura da direita) para o cenário da massa da bóia: $M_b = 10\%M_T$, assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas irregulares.

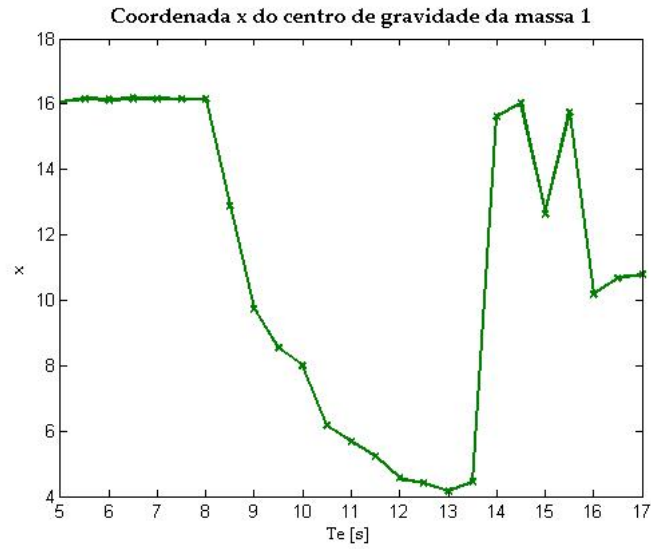


Figura 5.23: Coordenada x do centro de gravidade da massa 1 para o cenário da massa da bóia: $M_b = 10\%M_T$, assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas irregulares.

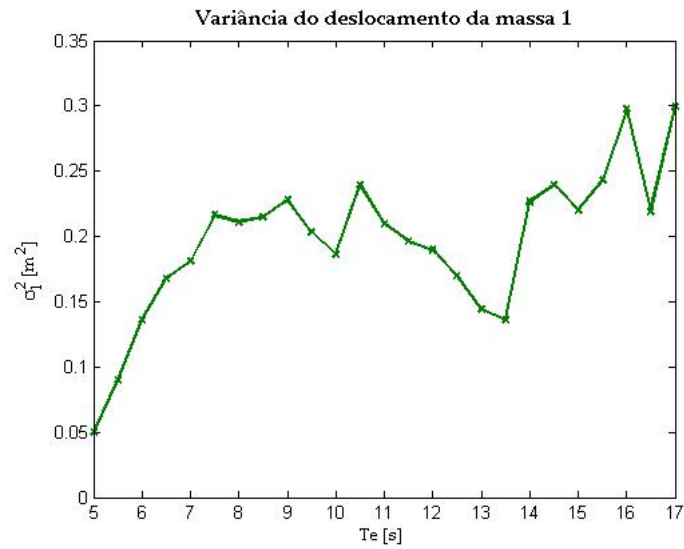


Figura 5.24: Variância do deslocamento da massa 1 para o cenário da massa da bóia: $M_b = 10\%M_T$, assumindo que o PTO é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L e pelo coeficiente de mola K_L , para ondas irregulares.

5.3.1.1 Resultados do Dispositivo com Quilha

Demonstrou-se pelas figuras 5.16 e 5.22 que a largura de captura do dispositivo depende directamente do valor da massa 1 e por consequente do centro de gravidade total do dispositivo, Z_g . Quanto maior o valor da massa 1 maior o valor absoluto de Z_g , o que resulta valores mais elevados para a largura de captura obtida pelo dispositivo. Assim sendo, fez-se um estudo onde se acrescentou uma quilha ao dispositivo, de modo a conseguir-se aumentar o valor da massa 1 o que permite baixar o centro de gravidade do dispositivo. Admite-se neste caso que a massa 2 encontra-se dentro desta quilha, o que possibilitaria baixar o centro de gravidade total do dispositivo (ver eq. 3.55), e assim obter-se melhores valores de largura de captura para uma gama de períodos de energia maior.

Para tal, realizou-se um modelo estocástico para otimizar o dispositivo com quilha e simulou-se o comportamento deste, só para o caso do cenário *a*) do sistema PTO. Nesta secção é descrita o processo de optimização do dispositivo com quilha e são apresentados os resultados obtidos.

O processo de optimização para este caso, dispositivo com quilha, é semelhante ao realizado para o dispositivo sem quilha (para o modelo estocástico), mas com algumas alterações nas restrições do problema. Para simplificar o problema, para este estudo considerou-se que o centro de gravidade da massa 2 pode-se situar numa área fora do dispositivo.

Então, para o dispositivo com quilha assumiu-se as coordenadas do centro de gravidade da massa 2 como variáveis de controlo, a coordenada z , z_{gm2} , só pode variar entre os valores $-45 \leq z_{gm2} \leq -32$. E a coordenada x do centro de gravidade da massa 2, x_{gm2} , dada pela equação 3.54, só pode variar entre os valores $-4 \leq x_{gm2} \leq 20$.

Depois de definida a nova área onde o centro de gravidade da massa 2 deve estar, realizou-se um estudo, o mesmo realizado para o dispositivo sem quilha (secção 4.3.1.1), para saber qual o valor máximo que a massa 1 pode ter para garantir que $Z_g \leq Z_{CF}$. Conclui-se que a massa 1 pode ter no máximo 50% da massa total do dispositivo.

Assim sendo, para o modelo estocástico com o dispositivo com quilha optimizaram-se as variáveis de controlo D_L , x_{gm1} , k e z_{gm2} que maximizam a largura de captura do dispositivo para cada período de energia considerado. Neste caso, o cenário do sistema PTO utilizado foi o cenário *a*) e os resultados só foram obtidos para o caso em que a massa da bóia é 15% da massa total do dispositivo (só se simulou para este caso da M_b porque o objectivo do estudo era ter uma ideia preliminar de qual o efeito da quilha no dispositivo).

A figura 5.25 à 5.28 apresentam os resultados obtidos para a optimização do dispositivo com quilha, com $M_b = 15\%M_T$, para o modelo estocástico.

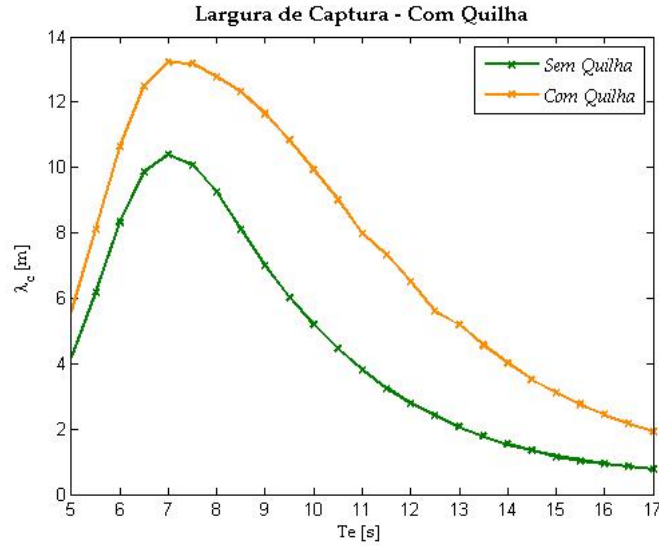


Figura 5.25: Comparação dos resultados da largura de captura do dispositivo com e sem quilha para o caso em que $M_b = 15\%M_t$, para períodos de energia de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s e H_s igual a 1 m, assumindo que o sistema PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L , para ondas irregulares.

Na figura 5.25 mostra-se a comparação das curvas da largura de captura do dispositivo com e sem quilha, para $M_b = 15\%M_T$. Verifica-se que o dispositivo apresenta uma melhor performance com quilha, obtendo valores mais elevados para a largura de captura para uma maior gama de T_e . E não se observa um decaimento tão acentuado da largura de captura após o pico desta (aos 7 s).

Verifica-se na figura 5.26 que a restrição de equilíbrio do dispositivo foi garantida pelo modelo. Uma vez que o intervalo permitido para o valor da massa 1 foi respeitado, fig. 5.26 (direita), e como resultado garantiu que $Z_g \leq Z_{CF}$ para todos os períodos de onda, fig. 5.26 (esquerda).

A otimização também respeitou o intervalo imposto à coordenada x do centro de gravidade da massa 1, ver figura 5.27, não ultrapassando o valor permitido para este caso $x_{gm1_{max}} = 15.23$, dado pela eq. 4.7, o valor utilizado para o valor da massa 1 para este cálculo foi de $50\%M_T$, o máximo que esta podia assumir.

A figura 5.28 apresenta as coordenadas x (figura da esquerda) e z (figura da direita) para o centro de gravidade da massa 2 para cada período de onda. Como é possível observar os limites impostos a estas coordenadas, $-4 \leq x_{gm2} \leq 20$ e $-45 \leq z_{gm2} \leq -32$, foram respeitados durante o processo de otimização.

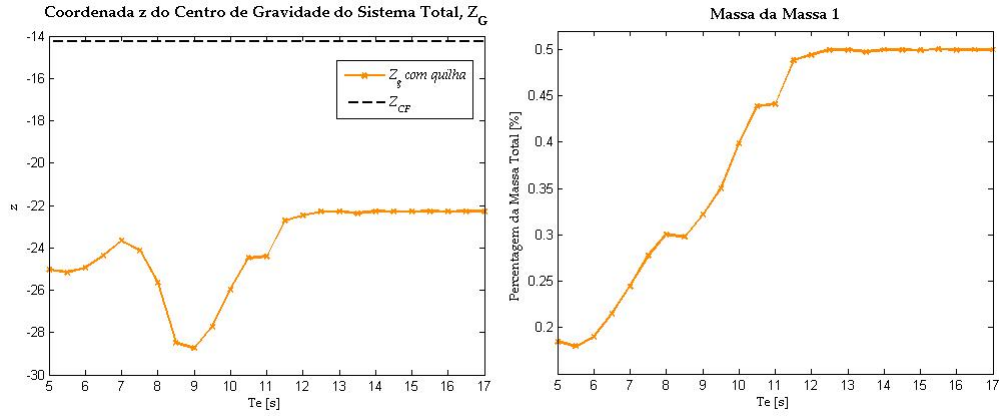


Figura 5.26: Resultados da restrição de equilíbrio do dispositivo com quilha: coordenada z do CG do sistema total Z_G (figura da esquerda) e valor da massa 1 em percentagem da massa total (figura da direita), para o caso em que $M_b = 15\%M_t$, para períodos de energia de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s e H_s igual a 1 m, assumindo que o sistema PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L , para ondas irregulares.

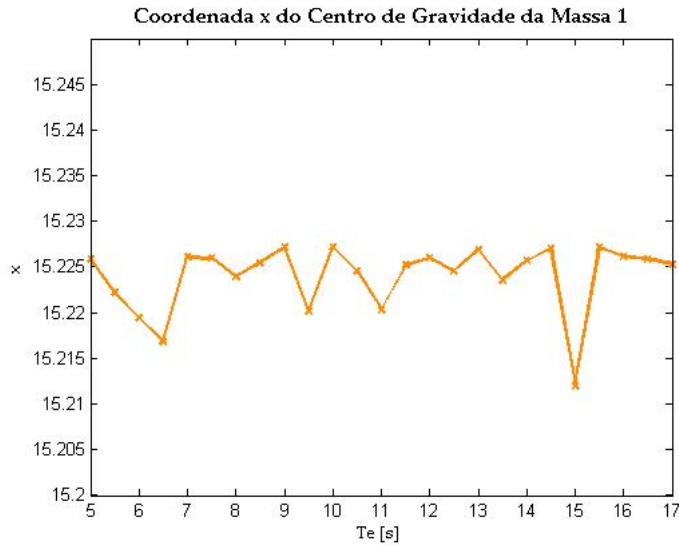


Figura 5.27: Coordenada x do centro de gravidade da massa 1 do dispositivo com quilha para o caso em que $M_b = 15\%M_t$, para períodos de energia de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s e H_s igual a 1 m, assumindo que o sistema PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L , para ondas irregulares.

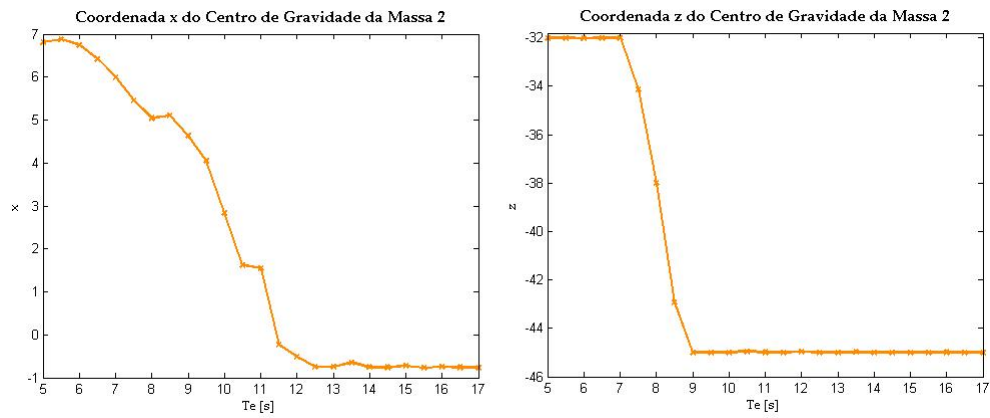


Figura 5.28: Coordenada x do centro de gravidade da massa 1 do dispositivo com quilha para o caso em que $M_b = 15\%M_t$, para períodos de energia de 5 a 17 s de 0.5 em 0.5 s e H_s igual a 1 m, assumindo que o sistema PTO só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L , para ondas irregulares.

5.3.2 Discussão

No modelo estocástico, o dispositivo proposto apresenta bons resultados de largura de captura, como esperado apresenta resultados ligeiramente melhores de performance quando o sistema PTO é simulado com D_L e K_L .

Para o cenário *a*) do sistema PTO, e tal como acontece no modelo no domínio da frequência para ondas regulares, a largura de captura do dispositivo varia com a massa da bóia quando o valor da massa 1 se mantém. Assim, quando a massa da bóia aumenta a largura de captura diminui. É para o caso em que a massa da bóia representa 10% da massa total do dispositivo, $M_b = 10\%M_T$, que se obtêm os melhores resultados. Isto acontece, porque para este caso o valor da massa 1 pode tomar valores maiores (até $20\%M_T$) do que nos outros casos.

Contrariamente ao modelo no domínio da frequência para ondas regulares, os resultados para o modelo estocástico apresentam curvas bastante regulares para ambos os cenários do sistema PTO.

A largura de captura do dispositivo em ondas irregulares também demonstra uma grande dependência do valor da massa 1 (fig. 5.16). Quando se diminui o valor da massa 1, o módulo do valor de Z_g diminui, o que resulta diminuições na largura de captura.

Uma vez demonstrada esta dependência da largura de captura do valor da massa 1, e conseqüentemente do valor de Z_g , optou-se por acrescentar uma quilha ao dispositivo de modo a se conseguir baixar o centro de gravidade do dispositivo (isto é, aumentar o valor do módulo de Z_g) e aumentar o valor da massa 1. Os resultados obtidos para a largura de captura (fig. 5.25), para $M_b = 15\%M_T$ com o cenário *a*) do sistema PTO, apresentam melhores performances para o dispositivo com quilha. Para este caso têm-se melhores valores de largura de captura do dispositivo para mais períodos de energia.

5.4 Conclusão

Neste capítulo, demonstrou-se que os modelos matemáticos, modelo no domínio da frequência e o modelo estocástico, criados para simular numericamente o comportamento e otimizar a performance do dispositivo proposto neste trabalho garantem as restrições do problema, apresentando bons resultados para o comportamento do dispositivo.

Para ambos os modelos, conclui-se que o dispositivo apresenta melhores resultados quando simulado com um sistema PTO com o coeficiente de amortecimento D_L e de mola K_L , tal como era esperado.

Relativamente ao modelo no domínio da frequência para ondas regulares, em de-

terminados períodos de onda K_L apresenta valores negativos, o que implicaria obter uma mola com um coeficiente de rigidez negativo, o que na prática é muito difícil de obter. Tal não acontece para o modelo estocástico onde os valores K_L são positivos para todos os períodos de energia.

Os dois cenários foram considerados para permitir avaliar a resposta dos coeficientes em frequência, e assim possibilitar um plano de estratégias mais adequado do controlo para condições de ondas irregulares no domínio do tempo.

Conclui-se, para ambos os modelos, que a largura de captura do dispositivo apresenta uma grande dependência do valor da massa 1, e consequentemente da coordenada z do centro de gravidade deste, Z_g . Quanto maior o valor da massa 1, maior o valor absoluto de Z_g e maior a largura de captura do dispositivo. O Z_g depende do valor da massa 1 e da massa da bóia.

Para ambos os modelos, os melhores resultados obtidos para a largura de captura ocorreram com um maior valor da massa 1 e uma menor massa da bóia.

A largura de captura também mostrou uma correlação com a massa da bóia, quando o valor da massa 1 apresenta as mesmas características. Com o aumento da massa da bóia a largura de captura diminui. Concluindo para massas menores da massa bóia e valores da massa 1 mais altas consegue-se obter melhores performances do dispositivo.

Quando se acrescenta uma quilha ao dispositivo em estudo, este apresenta melhores performances.

Para o modelo no domínio da frequência para ondas irregulares observou-se nos resultados da largura de captura que estes apresentam curvas bastante irregulares para períodos superiores a 16 s. Esta irregularidade que se obtém nos resultados, para determinados períodos, resulta do algoritmo genético estar a convergir para soluções que são máximos locais e não máximos globais.

A razão de algumas variáveis apresentarem um comportamento marcadamente oscilante mesmo para períodos em que a largura de captura não apresenta este tipo de oscilações, períodos abaixo dos 16 s, resulta da existência de várias combinações para as variáveis de controlo que podem maximizar a largura de captura, isto é, para determinados períodos a unicidade da solução para as variáveis de controlo não se verifica.

As curvas do modelo estocástico são mais regulares porque existe como que uma ponderação do comportamento do dispositivo para várias frequências que compõem o espectro que está a ser utilizado.

6

Sumário, Discussão e Trabalhos Futuros

6.1 Sumário

O presente trabalho teve como propósito uma melhor compreensão do comportamento e otimização da performance de um novo conceito de corpo oscilante para aproveitamento de energia das ondas *offshore*, proposto neste trabalho. Uma vez que se trata do primeiro estudo realizado ao dispositivo proposto, realizou-se uma análise no domínio da frequência para ondas regulares e irregulares (modelo estocástico) para se estudar e analisar o comportamento deste. Neste trabalho é descrita toda a formulação matemática necessária para se desenvolver os programas do domínio da frequência para ondas regulares e irregulares (modelo estocástico) para otimizar e modelar o funcionamento do dispositivo e para testar o seu comportamento. Os modelos foram simulados em *Matlab*.

No **capítulo 2**, foi realizada uma pequena descrição de alguns conversores de energia das ondas (CEOs). São mencionados os vários critérios propostos pela literatura [Falcão, 2009] para classificar os sistema de CEO, tendo em conta a localização, o princípio de funcionamento e tendo em conta a dimensão e/ou orientação do dispositivo. A descrição de CEO neste trabalho foi baseada no princípio de funcionamento destes: coluna de água oscilante (CAO), corpos oscilantes e galgamento. Uma vez que é o critério que permite uma organização mais simples dos CEOs. Com a breve descrição realizada de alguns dos dispositivos mais conhecidos na literatura observou-se que os corpos oscilantes são a tecnologia que existe em maior escala. Estes dispositivos acarretam a vantagem de conseguir explorar o elevado recurso energético das ondas em locais de águas mais profundas (*offshore*).

No **capítulo 3**, caracterizou-se um novo conceito de corpo oscilante para aproveitamento *offshore* de energia das ondas proposto neste trabalho. É feita uma descrição do funcionamento do dispositivo e da estrutura deste. A inovação do corpo oscilante

apresentado foca-se na forma como este extrai a energia das ondas. Este dispositivo apresenta duas massas internas, uma deslizante e outra fixa, e é através do deslocamento da massa deslizante em relação ao movimento que a bóia sofre por ação das ondas que se vai dar a extracção de energia. O sistema PTO utilizado no dispositivo é um sistema hidráulico que se encontra dentro do dispositivo conectado à massa deslizante.

No **capítulo 4**, descreveu-se toda a formulação matemática necessária para a construção dos programas de simulação numérica no domínio da frequência para ondas regulares e irregulares (modelo estocástico) do dispositivo proposto. Neste capítulo também se realizou uma breve descrição do programa WAMIT, programa utilizado para obter os coeficientes de hidrodinâmicos e de radiação necessários para a simulação do dispositivo.

No **capítulo 5**, é apresentada a formulação e o procedimento de optimização do dispositivo em estudo. Utilizou-se os algoritmos genéticos para realizar o processo de optimização. O dispositivo acarreta algumas restrições que o algoritmo de optimização teve que ter em conta. Este tem que garantir que o sistema não adorne, isto é que não existe rotação deste. Que o deslocamento da massa deslizante utilizada para extrair a energia não ultrapassa as dimensões do dispositivo e que as coordenadas do centro de gravidade desta massa se encontrava dentro dos limites permitidos. Uma vez que este se trabalho trata o primeiro estudo realizado a este dispositivo, no processo de formulação destas restrições foram consideradas algumas simplificações de modo a tornar o algoritmo mais simples e rápido.

No **capítulo 6**, analisou-se e discutiu-se os resultados obtidos pela simulação numérica e optimização das características do dispositivo proposto para os modelos no domínio da frequência para ondas regulares e irregulares (modelo estocástico).

6.2 Discussão Geral e Trabalhos Futuros

Um modelo no domínio da frequência (para ondas regulares) e um modelo estocástico (modelo no domínio da frequência para ondas irregulares) foram concebidos para simular e optimizar numericamente o comportamento do novo conceito de corpo oscilante *offshore* proposto neste trabalho. Que apresenta a inovação de a extracção de energia ser realizada devido ao deslocamento de uma massa deslizante que se encontra dentro do dispositivo. Foram obtidos resultados para ondas regulares e irregulares tendo em conta as restrições impostas. Para ambos os modelos considerou-se que o sistema *power take-off* (PTO) apresenta um comportamento linear e pode ser simulado por um coeficiente de amortecimento D_L e por um coeficiente de mola K_L . E ainda que a massa da bóia podia assumir diferentes valores, $M_b = 10\%, 15\%, 20\%, 25\%$ e $30\%M_T$.

No modelo no domínio da frequência para ondas regulares considerou-se que o sistema PTO podia ser simulado de duas formas: no cenário *a*) este só é simulado pelo coeficiente de amortecimento D_L ($K_L = 0$) e no cenário *b*) é simulado por D_L e K_L . O coeficiente K_L apresenta valores negativos para algumas frequências, na prática implicaria obter uma mola com coeficiente de rigidez negativo o que é muito difícil de se conseguir. Os dois cenários para o sistema PTO foram considerados para permitir avaliar a resposta dos coeficientes em frequências e possibilitar um plano de estratégias mais adequado do sistema PTO para condições de ondas irregulares no domínio do tempo.

O dispositivo proposto apresenta uma boa eficiência global para uma elevada gama de frequências ω , para ambos os cenários do PTO. Apresentando resultados ligeiramente melhores quando o sistema PTO é simulado com D_L e K_L .

As restrições impostas a este modelo relativas ao equilíbrio do sistema, ao deslocamento da massa 1 deslizante e à coordenada x do centro de gravidade (CG) desta massa foram garantidas durante a simulação para ambos os cenários do sistema PTO.

Constatou-se que a largura de captura do dispositivo, para ambos os cenários do PTO, varia com a massa da bóia M_b . Para os casos em que a massa 1 assumia as mesmas características (casos em que $M_b = 15\%, 20\%, 25\%$ e $30\%M_T$, onde a massa 1 podia representar no máximo 15% da massa total do dispositivo - restrição relativa ao equilíbrio do dispositivo), quanto maior a massa da bóia menor é a largura de captura do dispositivo. Enquanto que para o caso em que $M_b = 10\%M_T$, a massa 1 podia representar $20\%M_T$, a largura de captura apresenta valores mais elevados para todas as frequências ω . Conclui-se que com uma bóia mais leve e uma massa deslizante mais pesada obtêm-se melhores resultados de largura de captura.

Os limites impostos ao valor da massa deslizante 1 devem-se à restrição assumida para existir equilíbrio do dispositivo (a coordenada z do CG do dispositivo tem que estar sempre abaixo da coordenada z do centro de flutuação (CF), $Z_g \leq Z_{CF}$) para este não adornar. Constatou-se que a largura de captura depende directamente da massa da bóia e do valor da massa 1, e previsivelmente de Z_g . Para este modelo verificou-se que a largura de captura apresenta uma grande dependência do valor da massa 1, quanto maior o valor da massa 1, o que implica valores absolutos maiores de Z_g , maior a largura de captura do dispositivo. Conclui-se que com um centro de gravidade do dispositivo menor obtêm-se melhores valores de largura de captura, pois permiti obter maiores valores para a massa 1.

Para o modelo no domínio da frequência para ondas regulares observou-se para determinados períodos da largura de captura, períodos menores que 16 s, para ambos os cenários do sistema PTO considerados, que as curvas apresentam bastantes irregularidades. Este fenómeno resulta do mau comportamento da solução pelo que o algoritmo apresenta dificuldade em convergir para a solução óptima global para cada frequên-

cia. O problema de optimização explicado neste trabalho apresenta várias variáveis de controlo e diferentes restrições o que implica, para este caso, poder existir mais do que uma solução óptima para cada frequência quando se optimiza os diferentes parâmetros de controlo.

Relativamente às oscilações presentes em algumas variáveis para períodos em que a largura de captura não apresenta este tipo de oscilações, períodos abaixo dos 16s, resulta da existência de várias combinações para as variáveis de controlo que podem maximizar a largura de captura.

Uma vez que o dispositivo comportou-se eficientemente em ondas regulares para uma banda de frequências relativamente grande, simulou-se o comportamento do dispositivo para ondas irregulares no domínio da frequência. A utilização do modelo estocástico para ondas irregulares permitiu encontrar as variâncias que definem as funções densidade de probabilidade Gaussiana para as variáveis que definem o comportamento do dispositivo.

Como esperado, os resultados obtidos para a largura de captura do dispositivo para o modelo estocástico são significativamente mais baixos do que os obtidos para o modelo no domínio da frequência. Ainda assim, o dispositivo apresenta um enorme potencial para ondas irregulares. É de notar que a potência disponível para o sistema PTO varia com o quadrado da altura significativa.

Para o modelo estocástico as curvas com os resultados da optimização da performance do dispositivo são bastante mais regulares quando comparadas com as obtidas para o modelo no domínio da frequência para ondas regulares. As curvas apresentam-se mais regulares porque neste caso existe como que uma ponderação do comportamento do dispositivo para várias frequências que compõem o espectro que está a ser utilizado.

Tal como no modelo no domínio da frequência, as restrições impostas ao modelo estocástico, relativas ao equilíbrio do dispositivo e à coordenada x do CG da massa 1, foram garantidas para todos os períodos de energia considerados. E a largura de captura apresenta também uma correlação muito grande com o valor da massa 1, quanto maior o valor da massa 1, o que implica valores do módulo de Z_g mais elevados, maior a largura de captura do dispositivo. Assim, optou-se por acrescentar uma quilha ao dispositivo de maneira a se conseguir aumentar o valor da massa 1 e consequentemente baixar o CG do dispositivo. O Z_g do dispositivo depende directamente da coordenada z do CG da massa 2, se esta coordenada baixar o Z_g também baixa. Por isso, assumiu-se que a massa 2 encontra-se dentro da área da quilha. Ao se acrescentar a quilha ao dispositivo o intervalo do valor da massa 1, de modo a garantir que $Z_g \leq Z_{CF}$, aumenta. Comparando os resultados obtidos da largura de captura com e sem quilha, constata-se que o dispositivo obtém uma melhor performance com quilha. Nota-se também que a coordenada z do CG da massa 2 a partir dos 9s encontra-se sempre no

máximo permitido, para se superar este limite é sugerido que para um próximo trabalho se considere uma área da do centro de gravidade da massa 2 com um comprimento maior, isto é, uma quilha com uma área maior. O comprimento desta quilha deve ter em conta a profundidade para qual o dispositivo é simulado, neste caso 80 metros, permitindo haver espaço suficiente para a quilha não bater no fundo do mar.

Outra sugestão para um trabalho futuro, consiste em simular o comportamento do dispositivo fazendo-se um estudo mais completo e aprofundado do centro de gravidade do sistema, e não assumir um cenário tão conservador, como o assumido neste trabalho. Poderá também passar por simular o comportamento do dispositivo, para a mesma geometria, mas para diferentes tamanhos e ângulos do eixo da massa 1. Outro aspecto a estudar-se depois de afinadas estas características do dispositivo é o estudo e simulação do sistema *power take-off* (PTO) como um sistema não-linear para ondas irregulares, isto é, uma análise no domínio do tempo em que estratégias de controlo mais elaboradas poderão ser definidas.

6.3 Conclusão

Em conclusão, com este trabalho, foram estabelecidos os modelos e métodos necessários para se estudar o comportamento do dispositivo proposto no domínio da frequência para ondas regulares e estocasticamente para ondas irregulares.

O trabalho atingiu os seus objectivos e com resultados bastante positivos e elucidativos. O novo conceito proposto neste trabalho para um corpo oscilante *offshore* comportou-se eficientemente quer no domínio da frequência para ondas regulares quer estocasticamente para ondas irregulares, apresentando um potencial que poderá ser explorado.



As Ondas

As ondas do mar são uma forma indirecta da energia solar. O aquecimento diferenciado da atmosfera gera diferenças de pressão, que dão origem ao vento, e este, a partir de uma complexa interacção com a superfície do mar, dá origem às ondas [Falcão, 2009]. A energia do vento transferida para a água é feita na forma de energia potencial (massa de água acima ou abaixo do nível médio das águas do mar) e na forma de energia cinética (movimento de partículas). A quantidade de energia transferida é dependente da velocidade do vento, do tempo que este sopra e do comprimento sobre a superfície do mar. Uma onda, quando formada, pode viajar milhares de quilómetros com mínimas perdas de energia.

As ondas geradas por ventos locais, vagas (em notação inglesa: *wind-sea*), apresentam uma aparência desordenada no local de geração. À medida que estas ondas de forma irregular se afastam do local de formação e se propagam, vão adquirindo um aspecto mais ordenado a que se dá o nome de ondulação (em notação inglesa: *swell*), ver figura A.1.

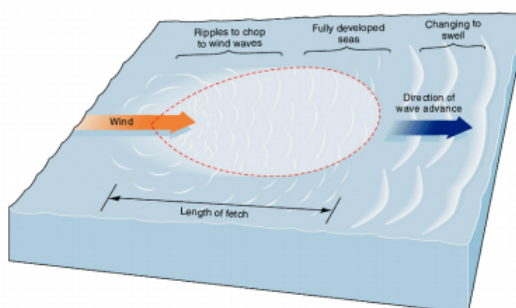


Figura A.1: Desenvolvimento das ondas de superfície por acção do vento na superfície do oceano. Adaptado de [da Silva Morais, 2009].

Este anexo reúne nomenclatura e alguma teoria sobre as características das ondas, baseada sobretudo em [Holthuijsen, 2007].

A.1 Características das Ondas

As ondas do mar são caracterizadas por um conjunto de parâmetros: a amplitude (a em metros), o comprimento de onda (λ em metros), a altura da onda (H em metros), a profundidade da água onde as ondas se propagam (h em metros) e o período (T em segundos).

A figura A.2 apresenta um esquema bidimensional da propagação de uma onda na direcção de x . A altura da onda, H (em metros), é a distância medida na vertical entre uma crista (ponto mais alto da onda) e uma cava (ponto mais baixo da onda). A amplitude da onda, a (em metros), é a distância medida na vertical entre uma crista ou uma cava, e o nível médio da água, isto é:

$$a = \frac{H}{2} . \quad (\text{A.1})$$

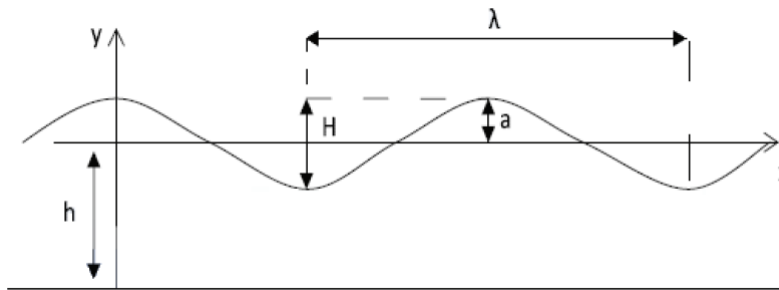


Figura A.2: Característica de uma onda.

O comprimento de onda λ , é a distância horizontal entre duas cristas sucessivas, ou alternativamente, a distância entre duas cavas. Através do comprimento de onda é possível definir-se o número de onda, k [m^{-1}]:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} . \quad (\text{A.2})$$

O período de onda, T (em segundos), é o intervalo de tempo que uma onda demora a percorrer uma distância igual ao seu comprimento. É possível obter-se a frequência

de uma onda, f (Hz), segundo o seu período:

$$f = \frac{1}{T} . \quad (\text{A.3})$$

E segundo a frequência de uma onda é possível definir-se a frequência angular, ω (rad/s):

$$\omega = \frac{2\pi}{f} . \quad (\text{A.4})$$

A velocidade de fase (em m/s), c , define-se pela velocidade com que a crista e cava de uma onda individual se propaga. Ou seja, é a velocidade de propagação da forma da onda. Esta velocidade para uma profundidade arbitrária pode ser obtida pela relação entre o comprimento de onda e o período ou entre a frequência angular e o número de onda:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} . \quad (\text{A.5})$$

Para o estudo da velocidade de propagação de uma onda em diferentes profundidades é necessário ter em conta a tabela A.1. De forma adimensional o factor h/λ indica uma profundidade relativa [André, 2010].

Tabela A.1: Classificação de profundidade. Adaptado de [André, 2010].

h/λ	Classificação da Profundidade
$h/\lambda \rightarrow \infty$	Profundidades infinitas
$h/\lambda \rightarrow \frac{1}{2}$	Grandes profundidades
$\frac{1}{20} < h/\lambda < \frac{1}{2}$	Profundidades intermédias
$h/\lambda < \frac{1}{20}$	Pequenas profundidades

A relação de dispersão (equação A.6) resulta da condição de fronteira na superfície livre:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) . \quad (\text{A.6})$$

Rescrevendo a equação A.5 tendo em conta a equação A.6, obtêm-se:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} . \quad (\text{A.7})$$

A relação A.6 mostra que se kh for muito grande (na prática se $h/\lambda > \frac{1}{2}$) tem-se $\tanh(kh) \rightarrow 1$ para $kh \rightarrow \infty$ e, conseqüentemente, $\omega^2 \rightarrow gk$. Assim, a equação A.7 para águas profundas reduz-se a:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k}} , \quad (\text{A.8})$$

nesta situação, para $h/\lambda > \frac{1}{2}$, as ondas não são influenciadas pelo fundo oceânico.

Para pequenas profundidades, $h/\lambda < \frac{1}{20}$, a velocidade de propagação só depende da profundidade:

$$c = \sqrt{\frac{g}{h}} . \quad (\text{A.9})$$

A expressão A.9 demonstra a independência da celeridade de h e f . Nesta condições diz-se que as ondas são não-dispersivas.

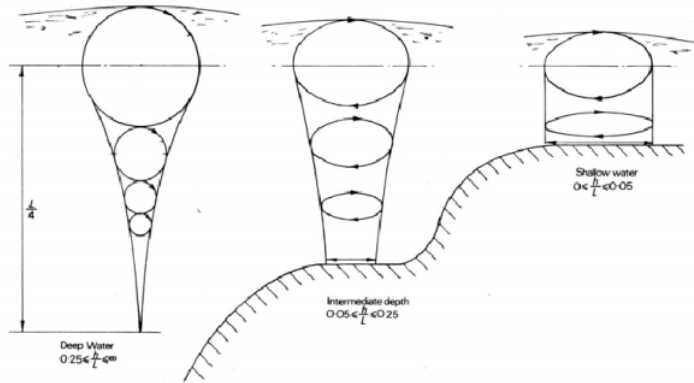


Figura A.3: Trajectória das partículas de fluido em diferentes profundidades. Adaptado de [Holthuijsen, 2007]

No movimento das ondas, as partículas de água descrevem trajectória aproximadamente fechadas. Para águas profundas, $h/\lambda > \frac{1}{2}$, as órbitas das partículas são circulares, ver figura A.3. No entanto, quanto menos profunda é a água a órbita das partículas tendem a ser elipsóides, ver figura A.3. E este movimento elipsóide das partículas torna-se mais esguio à medida que se aproxima do fundo marinho.

De notar que, no caso do dispositivo em estudo, a direcção da onda não é relevante uma vez que é um corpo flutuante.

A.2 Distribuição Estatística

A acção do vento do vento cria uma constante variação na altura de onda, período e direcção das ondas formando um perfil desordenado e irregular, ver figura A.4. Estes fenómenos têm vindo a ser demonstrados por equipamentos de medição, como as bóias ondógrafos. Estes equipamentos estão localizados em diferentes pontos do globo terrestre e têm como principal função caracterizar o recurso das ondas, desde da orientação, altura de onda, período, temperatura, entre outros.

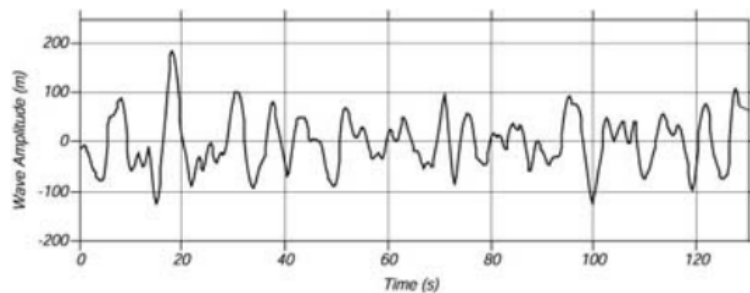


Figura A.4: Registo de uma bóia oceanográfica ao largo do Atlântico Norte. Adaptado de [da Silva Moraes, 2009]

Devido à sua grande aleatoriedade, modelar o comportamento ondulatório de um clima de ondas é extremamente complexo e apenas é possível obter um comportamento razoável através de uma análise estatística.

Um estado do mar é normalmente descrito por parâmetros estatístico como a altura significativa (em notação inglesa: *wave height*), H_s , e o período de onda. Quando a série temporal é analisada estatisticamente utiliza-se o período médio de ondas (em notação inglesa: *wave period*), T_z , e se o espectro das condições do mar for obtido de medições realizadas em mar utiliza-se o período de energia (em notação inglesa: *energy period*), T_e .

O período (T) da onda define-se como o tempo entre sucessivos movimentos ascendentes cruzando o nível médio. A distância vertical entre a cava e a crista da onda por sua vez define a altura individual da onda (H). O período torna-se particularmente importante quando se pretende analisar o comportamento das estruturas ao período de ressonância.

A altura média da onda, H_m , define-se como a média das alturas individuais (expressão A.10), e a altura significativa, H_s deriva da análise estatística e é definida como

um terço da média das ondas maiores presentes na série temporal analisada (expressão A.11). O que representa 1.6 vezes o valor da altura média.

$$H_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i . \quad (\text{A.10})$$

$$H_s = H_{\frac{1}{3}} = 1.6H_m . \quad (\text{A.11})$$

A.3 Representação Espectral das Ondas

A modelação numérica da superfície do oceano ou em tanques de ondas experimentais utiliza espectros de ondas derivados do conhecimento das condições do vento. E os estados do mar caracterizados pelos parâmetros H_s e T_e podem ser determinados através do conhecimento das condições do vento.

Para estados de mar em desenvolvimento utiliza-se o Espectro de JONSWAP e para estado do mar totalmente desenvolvidos o Espectro de Pierson-Moskowitz.

O conceito de espectro é baseado no trabalho de Joseph Fourier, que mostrou que quase qualquer função $f(t)$, pode ser representado no intervalo $(-T/2 < t < T/2)$ como a soma de uma série infinita de funções co-seno e seno com frequência de onda harmónica. O espectro de energia das ondas é deste modo obtido da derivada da análise de Fourier à elevação da onda (expressão A.12), ver figura A.5.

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \alpha_i) , \quad (\text{A.12})$$

onde N é o número de frequências e a amplitude a_i e a fase α_i são variáveis aleatórias.

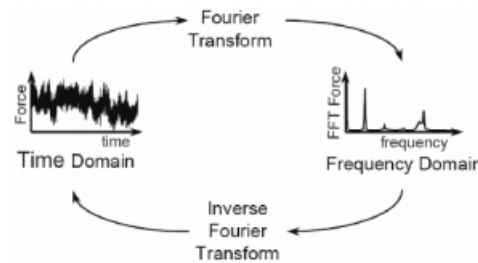


Figura A.5: Esquema de transformação de uma série temporal para o domínio das frequências através da transformada de Fourier. Adaptado de [da Silva Moraes, 2009]

As ondas reais não são sinusoidais, mas podem ser representadas, com uma boa aproximação, como a soma de ondas sinusoidais. Desta maneira a variação da superfície do mar pode ser interpretada como a sobreposição de um número infinito de ondas regulares propagando-se em diferentes direcções, amplitudes, períodos e fases, como é possível observar na figura A.6.

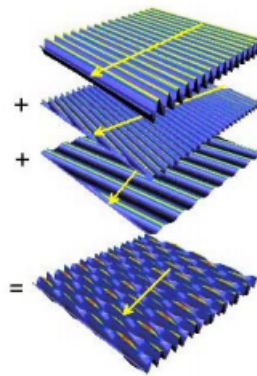


Figura A.6: Resultado da soma de ondas com diferentes amplitudes, comprimentos e direcções. Adaptado de [Holthuijsen, 2007]

O espectro de energia das ondas, $S(f)$, apresenta a distribuição de cada frequência, uma vez que a energia contida em cada componente de onda é proporcional ao quadrado da altura de onda. Como se verifica na figura A.7, o espectro de energia das ondas $S(f)$ descreve a densidade de energia contida em diferentes frequências.

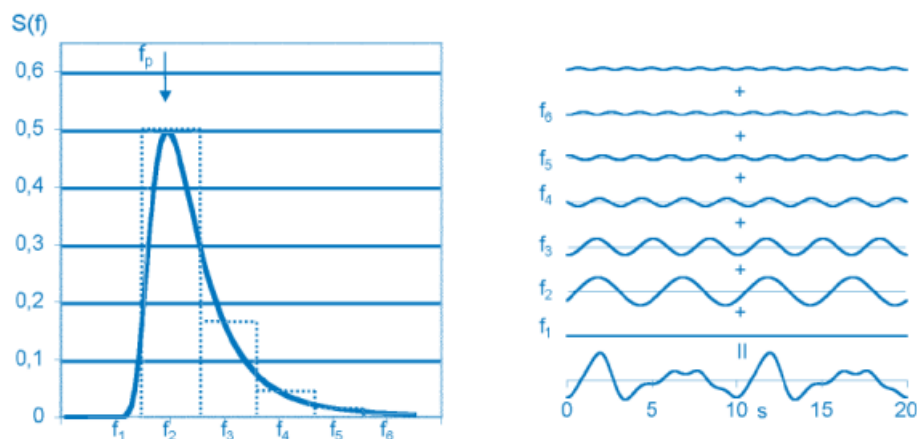


Figura A.7: Espectro de energia das ondas, que mostra a distribuição de energia para cada frequência. Adaptado de [da Silva Moraes, 2009]

O total de energia do espectro, m_0 , deriva do total da área formado pelo espectro:

$$m_0 = \int S(f)df, \quad (\text{A.13})$$

Frequentemente, o espectro caracteriza-se por apresentar um valor de pico para uma determinada frequência, a frequência para o qual ocorre esse valor é designado por frequência de pico, f_p . O período que corresponde a essa frequência é considerado o período de pico da onda, T_p , e é definido pela seguinte expressão:

$$T_p = \frac{1}{f_p}. \quad (\text{A.14})$$

A altura significativa é proporcional à raiz quadrada da área do espectro:

$$H_s = H_{m_0} = 4\sqrt{m_0}. \quad (\text{A.15})$$

Conclui-se que através das medições realizadas em diferentes pontos do globo terrestre é possível obter informações sobre as características da elevação do mar, desde do período, altura, direcção entre outras. A partir desses dados foi e é possível identificar a altura significativa, H_s , e o período de ondas de diferentes estados do mar e isso permitiu descrever as condições do mar através de espectro, como o JONSWAP e Pierson-Moskowitz.

O primeiro espectro foi desenvolvido tendo como base o estudo de dados de registos de onda obtidos no mar do Norte. Este representa estados do mar em desenvolvimento. O segundo espectro, espectro de Pierson-Moskowitz, pretende caracterizar um estado do mar completamente desenvolvido.

B

Opções WAMIT

B.1 Ficheiros de Entrada

Este capítulo foi escrito com base na literatura [WAMIT, 2002]. Para correr o programa WAMIT no âmbito da modelação de um corpo flutuante livre, é necessário fornecer quatro ficheiros de entrada, ver figura B.1, em formato texto, que devem estar posicionados na directoria de trabalho.

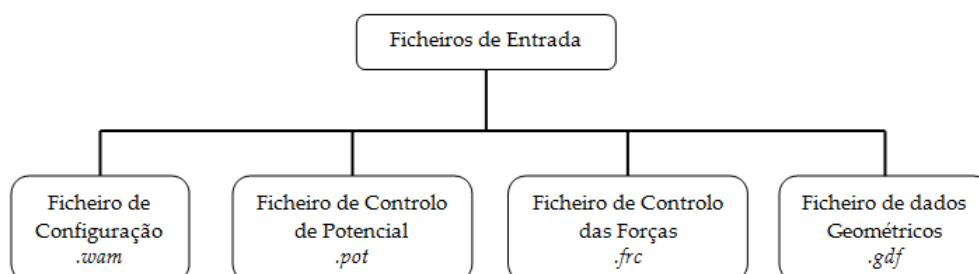


Figura B.1: Esquema dos ficheiros de entrada no WAMIT.

De seguida, são descritos os ficheiros de entrada com as opções utilizadas no presente trabalho. Para cada ficheiro foi construída uma tabela com as opções usadas no presente estudo, onde a 1ª coluna refere-se ao cálculo das propriedades descritas na 2ª coluna. Em alguns casos o “1” significa calcular e o “0” não calcular.

As opções utilizadas no ficheiro de controlo de potencial, ficheiro “.pot”, encontram-se discriminadas na tabela B.1, onde:

- HBOT representa a profundidade da água no local em estudo, neste caso 80 metros. Para profundidades infinitas devem usar-se valores inferiores a 0;

- IRAD e IDIFF são opções usadas para especificar se os problemas de radiação e difracção, respectivamente, são resolvidos ou não. Quando assumem valores iguais a -1 , não resolvem os respectivos problemas. Para valores iguais a 0 , resolvem os problemas apenas para os graus de liberdade seleccionados na variável IMODE. Para valores iguais a 1 , resolvem os problemas para todos os modos;
- NPER é o número de frequências que são analisados e PER o intervalo entre estas;
- NBETA é o número de posições da onda incidente e BETA o respectivo ângulo, neste caso existem duas ondas incidentes com direcções de 0° e 180° , os ângulos são em relação ao eixo xx ;
- NBODY é o número de corpos;
- GDF é o nome dado ao ficheiro “.gdf”;
- XBODY são as coordenadas de origem do corpo. O 4º zero é se houvesse um corpo acoplado, ter-se-ia de indicar o ângulo que este faria com o eixo xx ;
- IMODE indica os modos a calcular, o primeiro corresponde ao avanço/recuo, o terceiro à arfagem e o quinto ao cabeceio;
- NEWMDS é se houvesse outro corpo.

Tabela B.1: Opções do ficheiro de entrada “.pot”.

80	HBOT
0 0	IRAD, IDIFF
441	NPER
0.15 0.004426548	PER
2	NBETA
0.0 180.0	BETA
1	NBODY
Ana_30 _totalV2.gdf	GDF
0. 0. 0. 0.	XBODY
1 0 1 0 1 0	IMODE(1-6)
0	NEWMDS

As opções utilizadas no ficheiro de controlo das forças, ficheiro “.frc”, encontram-se descritas na tabela B.2, onde:

- IOPTN indica quais os parâmetros hidrodinâmicos a serem calculados. Apresenta-se como uma matriz linha com nove índices de opções. Se os índices assumirem o valor igual a 1 , o respectivo ficheiro de saída é calculado, no

caso de serem iguais a 0, os ficheiros não são calculados. Os índices da matriz correspondem aos seguintes ficheiros de saída:

1. Coeficientes de massa adicional e amortecimento;
 2. Forças de excitação obtidas através da relação de *Haskind*;
 3. Forças de excitação obtidas através do potencial de difracção;
 4. Movimento do corpo;
 5. Pressão hidrodinâmica na superfície do corpo e Vector velocidade na superfície livre;
 6. Campo de pressões na superfície livre;
 7. Campo de velocidade;
 8. Forças de arrasto e momento obtido pelo impulso;
 9. Forças de arrasto e momento obtido pela pressão.
- RHO é o valor da densidade da água;
 - XCG, YCG e ZCG correspondem às coordenadas do centro de gravidade do corpo;
 - IMASS, IDAMP, ISTIF, BETAH e NFIELD são dados que não são calculados nem fornecidos ao programa.

Tabela B.2: Opções do ficheiro de entrada “.frc”.

1 1 1 0 0 0 0 0	IOPTN(1-9)
1025.	RHO
0.0 0.0 0.0	XCG YCG ZCG
0	IMASS
0	IDAMP
0	ISTIF
0	BETAH
0	NFIELD

O ficheiro “.wam” é utilizado para especificar vários parâmetros e opções de resolução. Na tabela B.3 são especificadas as opções utilizadas neste ficheiro, onde:

- ILOWHI indica qual o método a ser utilizado: *low-order method* (= 0) ou *higher-order method* (= 1) (mais informações na secção 3.8);
- IPOTEN e IFORCE especificam se é pretendido executar os subprogramas POTEN e FORCE, respectivamente. Se assumirem valores de 1, os subprogramas são executados, e se forem iguais a 0, não;

- IALTPOT e IALTFRC especificam o formato utilizado nos ficheiros de controlo de potencial e força;
- ISOLVE permite escolher o método de resolução do problema. Pode-se optar entre o método directo (= 1) ou iterativo (= 0);
- ISOR opção que especifica se se calcula para *source strenght*: = 1 calcula-se e = 0 não se calcula;
- IPERIO especifica as unidades dos dados de entrada de PER no ficheiro de controlo de potencial. Se for igual a 1 os valores são períodos (em segundos), igual a 2 são frequências (em radianos por segundo) e igual a 3 ou 4 são para números de onda de profundidade infinita e finita, respectivamente;
- IRR é a opção usada para definir se as frequências irregulares são removidas ou não. Se for igual a 0 não remove e se for igual a 1 remove;
- IQUAD, ILOG e IDIAG são opções que podem ser usadas para aumentar a precisão da integração da função de *Green* e suas derivadas. O IQUAD E IDIAG só são utilizados no *low-order method*,
 - IQUAD igual a 1 a integração é realizada usando quatro nós da quadratura de *Gauss* e se igual a 0 é usada a integração da parte regular ondulatória da função de *Green* usando um único nó no centróide de cada painel;
 - Para ILOG igual a 1, a singularidade logarítmica na função de *Green* é subtraída e integrada analiticamente. Esta opção produz resultados mais precisos. Para ILOG igual a 0 a singularidade logarítmica é tratada com a componente ondulatória da função *Green* e integrada por quadratura em cada painel;
 - IDIAG igual a 1 o comprimento característico de cada painel é baseado na sua diagonal máxima, sendo que a opção 0 calcula a distância entre os centróides dos painéis, comparando o comprimento característico com a raiz quadrada da área de cada painel.
- MONITR é o parâmetro usado para controlar a exibição no monitor de saída durante a execução do FORCE;
- NUMHDR é a opção utilizada para controlar a escrita de um cabeçalho de uma linha nos ficheiros numéricos de saída. Se igual a 0 nenhum cabeçalho é incluído e se igual a 1 uma linha de cabeçalho é incluída;
- ISCATT é a opção que permite especificar se o problema de difracção ou de *scattering* é resolvido para obter o potencial de difracção. Igual a 1 resolve o problema de *scattering* e igual a 0 resolve o problema de difracção;

- MAXITT especifica o número máximo de iterações na opção de calculo iterativo;
- USERID_PATH é onde se deve especificar a directoria onde o ficheiro de instalação USERID.WAM está localizado.

Tabela B.3: Opções do ficheiro de entrada “.wam”.

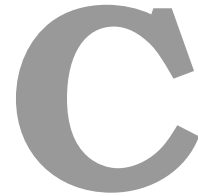
0	ILOWHI
1	IPOTEN
1	IFORCE
2	IALTPOT
2	IALTFRC
0	ISOLVE
0	ISOR
2	IPERIO
0	IRR
1	IQUAD
1	ILOG
0	MONITR
1	NUMHDR
0	ISCATT
1	IDIAG
3000	MAXITT
20000	MAXSCR
E:\TEMP	SCRATCH_PATH
E:\Wamitv6	USERID_PATH

A tabela B.4 apresenta as opções utilizadas para o ficheiro “.gdf”, onde:

- ULEN é o comprimento característico da bóia em estudo, ou seja, neste caso está na escala 1 : 1;
- GRAV é a gravidade;
- ISX e ISY indicam a simetria nos eixos xx e yy . Se igual a 0 indica que não existe simetria nos eixos e se igual a 1 existe simetria;
- NPAN indica o número de painéis utilizados;
- Abaixo têm que estar enumeradas as coordenadas de todos os painéis, neste caso só são apresentadas as coordenadas de dois painéis. Cada painel é definido por três pontos, coordenada xx , yy e zz de cada painel. A sequência em que se introduzem os pontos do painel é no sentido directo relativamente à normal exterior.

Tabela B.4: Opções do ficheiro de entrada “.wam”.

1.0 9.806650	ULEN GRAV
0 0	ISX ISY
408	NPANC
8.000 0.000 0.000	Coord. dos Painéis
9.732 0.000 -1.000	



Regra do Trapézio

As equações do modelo estocástico: da 3.32 à 3.39, a 3.41, 3.43 e 3.44 podem ser avaliadas numericamente utilizando a regra dos trapézios, e no caso deste trabalho foi utilizada a função *trapz* do *Matlab*.

A função *trapz* permite determinar o valor da integração de uma determinada função $f(x)$ segundo o método trapezoidal, que consiste na determinação do valor da integração somando a área dos trapézios formados a partir de pontos da curva da função $f(x)$ [Morais and Vieira, 2013]. Isto é obtido através da divisão do domínio em $n + 1$ pontos discretos, de tal modo que $\vec{x} = x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n$, onde x_0 e x_n são os limites da integração e $\delta x = x_{i+1} - x_i$ é o tamanho do incremento, e calculando a função em cada. O integral da função entre cada par adjacente no domínio, $\int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x)dx$, pode ser aproximado pela área de um trapézio com vértices $(x_i, 0), (x_i, f(x_i)), (x_{i+1}, 0)$ e $(x_{i+1}, f(x_{i+1}))$ tal que:

$$\text{Área do Trapézio} = \frac{1}{2}(f(x_{i+1}) + f(x_i))\delta x.$$

Estas áreas podem ser somadas para aproximar o integral entre os limites x_0 e x_n :

$$\int_{x_0}^{x_n} f(x)dx = \left(\frac{1}{2}(f(x_0) + f(x_n)) + \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) \right) \delta x. \quad (\text{C.1})$$

Referências

- Rui Alexandre Aranda André. Modelação de um sistema de conversão de energia das ondas. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- Charlotte Beels, Peter Troch, Griet De Backer, Marc Vantorre, and Julien De Rouck. Numerical implementation and sensitivity analysis of a wave energy converter in a time-dependent mild-slope equation model. *Coastal Engineering*, 57:471–492, 2010a.
- Charlotte Beels, Peter Troch, Kenneth De Visch, Jens Peter Kofoed, and Griet De Backer. Application of the time-dependent mild-slope equations for the simulation of wake effects in the lee of a farm of wave dragon wave energy converters. *Renewable Energy*, 35:1644–1661, 2010b.
- Gonçalo Fernandes Beirão. Protótipo de um gerador linear para aproveitamento de energia das ondas num sistema aws. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2010.
- C. B. Boake, T. J. T. Whittaker, M. Folley, and H. Ellen. Overview and initial operational experience of the limpet wave energy plant. *International Offshore and Polar Engineering Conference*, ISOPE-2002:586–594, 2002.
- A. Brito-Melo, L.M.C. Gato, and A.J.N.A. Sarmiento. Analysis of wells turbine design parameters by numerical simulation of the owc performance. *Ocean Engineering*, 29:1463–1477, 2002.
- K. Budal, J. Falnes, L.C. Iversen, P.M. Lillebekken, G. Olstedal, T. Hals, and T. Onshus. The norwegian wave-power buoy project. *Proceedings of 2nd International Symposium on Wave Energy Utilization, Trondheim*, pages 323–44, 1982.
- Alain Clément, Pat McCullen, António Falcão, Antonio Fiorentino, Fred Gardner, Karin Hammarlund, Geroge Lemonis, Tony Lewis, Kim Nielsen, Simona Petroncini, M. Teresa Pontes, Phillippe Schild, Bengt-Olov Sjöström, Hans Christian Sorensen, and Tom Thorpe. Wave energy in europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews - Elsevier*, 6:405–431, 2002.
- J. Cândido and P.A.P. Justino. Frequency-domain and stochastic model for an articulated wave power device. *European Wave and Tidal Energy Conference*, 2007.
- José Cândido and Paulo Justino. Modelling, control and pontryagin maximum principle for a two-body wave energy device. *Renewable Energy*, 36:1545–1557, 2011.
- José J. Cândido and Paulo A.P.S. Justino. Frequency, stochastic and time domain model for an articulated wave power device. *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE*, 2008.

- J.M.P. Conde and L.M.C. Gato. Numerical study of the air-flow in an oscillating water column wave energy converter. *Renewable Energy*, 33:2637–2644, 2008.
- World Energy Council. Survey of energy resource 2001. Technical report, The World Energy Council, 2001.
- João Cruz and António Sarmento. Energia das ondas: Introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais. Technical report, Instituto do Ambiente, 2004.
- João Cruz and António Sarmento. Sea state characterisation of the test site of an offshore wave energy plant. *Ocean Engineering*, 34:763–775, 2006.
- A. Barata da Rocha, F. Jorge Lino, Nuno Correia, José Carlos Matos, Miguel Marques, and Tiago Morais. Offshore renewable energy development of ocean technology pproject at inegi. Technical report, INEGI, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, 2011.
- Tiago António Nunes da Silva Morais. Estudo da operação de parques de sistema de conversão de energia das ondas em energia eléctrica. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- Sandro Ricardo Vaz Velho da Silva Pereira. Caracterização do sector dos recursos energéticos marinhos para portugal continental. Master's thesis, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2010.
- A.F. de O. Falcão and R.J.A. Rodrigues. Stochastic modelling of owc wave power plant performance. *Applied Ocean Research*, 24:59–71, 2002.
- Kalyanmoy Deb. An introduction to genetic algorithms. *Sadhana*, 24:293–315, 1999.
- B. Drew, A.R. Plummer, and M.N. Sahinkaya. A review of wave energy converter technology. In *Proc. IMechE Vol. 223 Part A: J. Power and Energy*, 2009.
- Energy Information Administration EIA. International energy outlook 2013. Technical report, U.S. Energy Information Administration, 2013.
- António Falcão. Wave energy utilization: A review of the technologies. *ELSEVIER: Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009.
- António Falcão and Maria Teresa Pontes. The shoreline owc wave power plant on the island of pico, azores. *Proceedings of 16th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Yokohama, 13-18 April, 1997.
- António F. O. Falcão. Modelling and control of oscillating-body wave energy converters with hydraulic power take-off and gas accumulator. *Ocean Engineering*, 34:2021–2032, 2007.

- J. Falnes. Wave-energy conversion through relative motion between two single-mode oscillating bodies. *J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, 121:32–38, 1999.
- Johannes Falnes. *Ocean Waves and Oscillating Systems*. Cambridge University Press, 2002.
- M. Folley, R. Curran, and T. Whittaker. Comparison of limpet contra-rotating wells turbine with theoretical and model test predictions. *Ocean Engineering*, 33:1056–1069, 2006.
- Jörgen Hals. *Modelling and phase control of wave-energy converters*. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- Ross Henderson. Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the pelamis wave energy converter. *Elsevier*, 31:271–283, 2005.
- Leo H. Holthuijsen. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press, 2007.
- IEA. Ocean energy: Global technology development status. Technical report, International Energy Agency, 2009.
- Jens Peter Kofoed, Pter Frigaard, Erik Friis-Madsen, and Hans Chr. Sorensen. Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. *Renewable Energy*, 31: 181–189, 2006.
- Ivan Krishna. A sopac desktop study of ocean-based renewable energy technologies. Technical report, SOPAC, 2009.
- L. Margheritini, D. Vicinanza, and P. Frigaard. Ssg wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. *Renewable Energy*, 34:1371–1380, 2008.
- A.P. McCabe, A. Bradshaw, J.A.C. Meadowcroft, and G. Aggidis. Developments in the design of the ps frog mk 5 wave energy converter. *ELSEVIER*, 31:141–151, 2006.
- Vagner Moraes and Cláudio Vieira. *Matlab Curso Completo*. FCA - Editora de Informática, 2013.
- Luis Adriano Oliveira and António Gameiro Lopes. *Mecânica dos Fluidos*. ETEP - Edições Técnicas e Profissionais, 2010.
- José Pedro Sucena Paiva. *Redes de Energia Eléctrica: uma análise sistémica*. IST Press, 2011.

- N. N. Panicker. Power resource estimate of ocean surface-waves. *Ocean Engineering*, 3: 429–439, 1976.
- Teresa Pontes. Wave energy resource. *LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia*, 2012.
- Félix Roudier. Portfolio optimization and genetic algorithms. Master's thesis, Department of Management, Technology and Economics - DMTEX, 2007.
- S. H. Salter, J.R.M. Taylor, and N.J. Caldwell. Power conversion mechanisms for wave energy. In *Proc Instn Mech Engrs Vol 216 Part M: J Engineering for the Maritime Environment*, 2002.
- James Tedd and Jens Peter Kofoed. Measurements of overtopping flow time series on the wave dragon, wave energy converter. *Renewable Energy*, 34:711–717, 2008.
- Mateus Teles and Herbert Gomes. Comparação de algoritmos genéticos e programação quadrática sequencial para otimização de problemas de engenharia. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, 15:29–39, 2010.
- T. W. Thorpe. A brief review of wave energy. Technical report, AEA Technology, 1999.
- Duarte Valério, Pedri Beirão, and José Sá da Costa. Optimisation of wave energy extraction with the archimedes wave swing. *Ocean Engineering*, 34:2330–2344, 2007.
- Marco Vianello. Geometric optimization of an energy recovery system for inshore waves. Master's thesis, Università Degli Studi Di Padova, 2012.
- WAMIT. *WAMIT User Manual*. <http://www.wamit.com/manual.htm>, 2002.
- WaveEnergyCentre. Potencial e estratégia de desenvolvimento da energia das ondas em portugal. Technical report, Wave Energy Centre - Centro de Energia das Ondas, 2004.
- A. Weinstein, G. Fredrikson, M.J. Parks, and K. Nielsen. Aquabuoy - the offshore wave energy converter numerical modeling and optimization. *Proceedings of MTTs/IEEE Techno-Ocean'04 Conference, Kobe, Japan*, 4:1854–59, 2004.